

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В. о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Підвищення ефективності споживання
електричної енергії приватним будинком із використанням
альтернативних джерел енергії»

Виконав

_____ (підпис)

Олексій КОСТРАБА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група

З ЕТЕ 2401м

Науковий керівник:

_____ (підпис)

Віктор КОЗІН
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

_____ (підпис)

Олена ДОВЖИК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

завдання на дипломну (магістерську) роботу

АНОТАЦІЯ

Костраба О. О. Підвищення ефективності споживання електричної енергії приватним будинком із використанням альтернативних джерел енергії : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Олексій Олегович Костраба; керівник Віктор Миколайович Козін. – Суми : СНАУ, 2025. – 102 с.

Кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за другим (магістерським) рівнем вищої освіти здобувача групи З ЕТЕ 2401 м інженерно-технологічного факультету Сумського національного аграрного університету Костраби Олексія Олеговича на тему: «Підвищення ефективності споживання електричної енергії приватним будинком із використанням альтернативних джерел енергії».

Зміст розрахунково-пояснювальної записки: теоретичні основи енергоефективності домогосподарств (сучасні підходи до енергоменеджменту у приватному секторі; структура електроспоживання приватного будинку; огляд технологій підвищення енергоефективності; альтернативні джерела енергії для приватного господарства); характеристика господарства (загальна схема та енергетична інфраструктура господарства; теплиця; ділянка приготування кормів для свиней і ВРХ; дані режимів енергоспоживання господарства; методика енергетичного обстеження); енергетичний аудит та базовий енергобаланс господарства (аналіз профілів навантаження; аналіз основних електроприймачів об'єкту; втрати в електричній мережі та якість електроенергії; базовий енергобаланс); технічні та організаційні заходи з підвищення енергоефективності (житловий будинок; тепличне господарство; підготовка кормів для свиней і ВРХ; водопостачання, каналізація та відкачування гноївки; холодильні установки та кондиціонування; компенсація реактивної потужності та корекція $\cos\phi$ для трифазних споживачів; система

моніторингу і технічного обслуговування); інтеграція альтернативних джерел енергії та накопичувачів (фотоелектричні системи; системи накопичення електроенергії; малі вітроенергоустановки; біоенергетика; теплові насоси та сонячні теплові колектори; інтелектуальні системи керування потоками енергії); проектні розрахунки та моделювання (заходи з енергозбереження; дослідження впливу регулювання електроприводу на енергозбереження; розрахунок і вибір обладнання сонячної електростанції); економічний розділ; охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях (електробезпека; пожежна безпека; параметри мікроклімату; план реагування на надзвичайні ситуації; розрахунок системи захисного заземлення та головної системи зрівнювання потенціалів).

У роботі виконано ґрунтовний огляд та подальший розрахунок енергозберігаючих заходів, що застосовують у приватних домогосподарствах. Досліджено технічний ефект від запровадження частотного регулювання електроприводу замість використання методу «пуск/зупин». Розраховано мережеву сонячну електростанцію.

У економічному розділі виконано розрахунки економічного ефекту від заміни світильників у приміщенні теплиці.

Наведено основні заходи з охорони праці, техніки безпеки та пожежної безпеки, виконано розрахунки безпечної експлуатації електрообладнання.

Кваліфікаційна робота має апробацію на 31-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в індустрії 5.0» (21-23 жовтня 2025 р.).

Ключові слова: електротехнології, тепличне господарство, частотно-регульований привід, сонячна електростанція, система освітлення.

Кваліфікаційна робота включає 11 ілюстрацій, 7 таблиць, 87 літературних джерел, 1 додаток.

ABSTRACT

Kostraba, O. O. Improving the efficiency of electricity consumption in private homes using alternative energy sources: Master's thesis in the field of '141 Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics' / Oleksii Kostraba; supervisor Viktor Kozin. – Sumy: SNAU, 2025. – 102 p.

Qualification work in the specialty 141 'Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics', educational and professional programme "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" for the second (master's) level of higher education of the applicant of group Z ETE 2401 m of the Faculty of Engineering and Technology of Sumy National Agrarian University Kostraba Oleksii on the topic: 'Improving the efficiency of electricity consumption in private homes using alternative energy sources'.

Contents of the explanatory note: theoretical foundations of household energy efficiency (modern approaches to energy management in the private sector; electricity consumption structure of a private house; overview of energy efficiency improvement technologies; alternative energy sources for private households); household characteristics (general layout and energy infrastructure of the household; greenhouse; area for preparing feed for pigs and cattle; data on the farm's energy consumption patterns; energy audit methodology); energy audit and basic energy balance of the farm (load profile analysis; analysis of the facility's main electrical appliances; losses in the electrical network and power quality; basic energy balance); technical and organisational measures to improve energy efficiency (residential building; greenhouse; preparation of feed for pigs and cattle; water supply, sewage and manure pumping; refrigeration and air conditioning; reactive power compensation and $\cos\varphi$ correction for three-phase consumers; monitoring and maintenance system); integration of alternative energy sources and storage devices (photovoltaic systems; electricity storage systems; small wind turbines; bioenergy; heat pumps and solar thermal collectors; intelligent energy flow management systems); design calculations and modelling (energy saving measures; research into

the impact of electric drive regulation on energy saving; calculation and selection of solar power plant equipment); economic section; occupational health and safety in emergency situations (electrical safety; fire safety; microclimate parameters; emergency response plan; calculation of the protective grounding system and the main potential equalisation system).

The work provides a thorough review and further calculation of energy-saving measures used in private households. The technical effect of introducing frequency control of electric drives instead of using the ‘start/stop’ method has been studied. A network solar power plant has been calculated.

The economic section contains calculations of the economic effect of replacing lighting fixtures in a greenhouse.

The main measures for occupational health and safety and fire safety are presented, and calculations for the safe operation of electrical equipment are performed.

The qualification work was tested at the 31st International scientific and practical conference ‘Innovative technologies in industry 5.0’ (21–23 October 2025).

Keywords: electrical engineering, greenhouse farming, frequency-controlled drive, solar power station, lighting system.

The qualification paper includes 11 Figures, 7 Tables, and 87 references, 1 appendix.

ЗМІСТ

	С.
ЗАВДАННЯ.....	2
АНОТАЦІЯ.....	3
ВСТУП.....	10
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ	
ДОМОГОСПОДАРСТВ.....	14
1.1 Сучасні підходи до енергоменеджменту у приватному секторі.....	14
1.2 Структура електроспоживання приватного будинку.....	15
1.3 Огляд технологій підвищення енергоефективності.....	16
1.4 Альтернативні джерела енергії для приватного господарства.....	17
Висновки з розділу 1.....	19
2 ХАРАКТЕРИСТИКА ГОСПОДАРСТВА.....	
2.1 Загальна схема та енергетична інфраструктура господарства.....	20
2.2 Теплиця.....	21
2.3 Дільниця приготування кормів для свиней і ВРХ.....	22
2.4 Дані режимів енергоспоживання господарства.....	23
2.5 Методика енергетичного обстеження.....	24
Висновки з розділу 2.....	26
3 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ ТА БАЗОВИЙ ЕНЕРГОБАЛАНС	
ГОСПОДАРСТВА.....	27
3.1 Аналіз профілів навантаження.....	27
3.2 Аналіз основних електроприймачів об'єкту.....	30
3.3 Втрати в електричній мережі та якість електроенергії.....	32
3.4 Базовий енергобаланс.....	32
Висновки з розділу 3.....	33
4 ТЕХНІЧНІ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ	
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....	34
4.1 Житловий будинок.....	34
4.2 Тепличне господарство.....	35

4.2.1 Досвітлювання рослин.....	35
4.2.2 Керування мікрокліматом.....	36
4.2.3 Теплопостачання.....	36
4.2.4 Система поливу.....	36
4.3 Підготовка кормів для свиней і ВРХ.....	37
4.3.1 Дробарки, млини, подрібнювачі.....	37
4.3.2 Змішувачі, гранулятори, транспортери, шнеки.....	37
4.3.4 Організаційні заходи.....	37
4.4 Водопостачання, каналізація та відкачування гноївки.....	37
4.5 Холодильні установки та кондиціонування.....	38
4.6 Компенсація реактивної потужності та корекція $\cos\varphi$ для трифазних споживачів.....	38
4.7 Система моніторингу і технічного обслуговування.....	38
Висновки з розділу 4.....	39
5 ІНТЕГРАЦІЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ТА НАКОПИЧУВАЧІВ.....	40
5.1 Фотоелектричні системи.....	40
5.2 Системи накопичення електроенергії.....	41
5.3 Малі вітроенергоустановки.....	42
5.4 Біоенергетика.....	42
5.5 Теплові насоси та сонячні теплові колектори.....	43
5.6 Інтелектуальні системи керування потоками енергії.....	43
Висновки з розділу 5.....	44
6 ПРОЄКТНІ РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ.....	45
6.1 Заходи з енергозбереження.....	45
6.1.1 Перехід на опалення теплиці від теплового насосу.....	45
6.1.2 Заміна ДНаТ ламп на фіто-LED у теплиці.....	49
6.1.3 Енергозбереження у кормоцеху та інших системах.....	53
6.2 Дослідження впливу регулювання електроприводу на енергозбереження.....	54

6.3 Розрахунок і вибір обладнання сонячної електростанції.....	65
Висновки з розділу 6.....	71
7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	73
Висновки з розділу 7.....	80
8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ....	82
8.1 Електробезпека.....	82
8.2 Пожежна безпека.....	83
8.3 Параметри мікроклімату.....	83
8.4 План реагування на надзвичайні ситуації.....	84
8.5 Розрахунок системи захисного заземлення та головної системи зрівнювання потенціалів.....	84
Висновки з розділу 8.....	89
ВИСНОВКИ.....	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93
ДОДАТКИ.....	103

ВСТУП

Ефективне використання електричної енергії у приватному домогосподарстві з інтегрованими альтернативними джерелами енергії (АДЕ) є одним з ключових напрямів сучасної енергетичної політики та практики розумного споживання. Ця тематика набуває особливої ваги в умовах зростання тарифів на електроенергію, потреби підвищення енергетичної безпеки та стійкості, а також прагнення домогосподарств до часткової енергонезалежності через використання фотоелектричних (PV) систем, акумуляторних сховищ та мікрогенерації. На рівні України розвиток енергоефективності будівель і домогосподарств, впровадження систем енергетичного менеджменту та гармонізація з відповідними європейськими стандартами закріплені законодавчо і нормативно [1; 2; 3–5]. Зокрема, вимоги до енергетичної ефективності будівель і систем автоматизації, а також до приєднання генерувальних установок до мережі низької напруги та випробувань PV-систем, уніфіковані з нормами ЄС, що формує узгоджене нормативне поле для розробок на рівні приватного сектору [3–7].

Актуальність теми зумовлена також зміною структури електроспоживання приватних господарств, де, крім традиційних побутових навантажень, з'являються технологічні процеси, характерні для малого агровиробництва: тепличне вирощування рослин, краплинне зрошення, мікроклімат-менеджмент, а також приготування кормів для свиней і великої рогатої худоби (подрібнення, змішування, гранулювання), вентиляція і освітлення підсобних приміщень. У таких системах електроспоживання стає добово та сезонно нерівномірним. Водночас PV-генерація і заряд/розряд накопичувачів мають власні профілі. Отже, дослідження методів координації генерації, зберігання та керування навантажень із забезпеченням нормативної якості електроенергії, електробезпеки та пожежної безпеки є науково і прикладно значущим завданням [7–11]. Нормативні орієнтири для такого середовища надають, зокрема, ДСТУ EN 50549-1 (приєднання генерувальних

установок до LV-мереж), ДСТУ EN 62446-1 (випробування та документація PV-систем), ДСТУ EN 60204-1 (електрообладнання машин у технологічних процесах), а також чинні ПУЕ, ПТЕЕС і правила пожежної безпеки [6–11].

Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні та розробленні комплексу організаційно-технічних рішень для підвищення ефективності використання електричної енергії приватним будинком, що веде тепличне господарство та має обладнання для приготування кормів свиням і ВРХ, через інтеграцію альтернативних джерел енергії, систем накопичення та інтелектуального керування електроспоживанням з урахуванням вимог національних і гармонізованих стандартів.

Для досягнення мети передбачено розв'язання таких **завдань**:

- обґрунтувати енергетичну модель домогосподарства з урахуванням добових та сезонних профілів навантаження і генерації;
- виконати енергоаудит за вимогами ДСТУ ISO 50002 з побудовою базових рівнів енергоспоживання та показників результативності за ДСТУ ISO 50006;
- розробити імітаційну модель енергетичного балансу «PV-система – акумулятор – мережа – керовані навантаження»;
- запропонувати алгоритми керування мікрокліматом теплиці та електроприводами технологічних агрегатів з урахуванням стандартів електробезпеки та якості електроенергії;
- провести техніко-економічну оцінку заходів і сценаріїв модернізації, включно з розрахунком показників окупності;
- сформулювати вимоги до безпеки праці та дій у надзвичайних ситуаціях у складі проєктних рішень.

Об'єктом дослідження є електроенергетична система приватного домогосподарства з тепличним комплексом і технологіями приготування кормів, інтегрована з альтернативними джерелами енергії та системою накопичення енергії.

Предметом дослідження є процеси формування та оптимізації потоків електричної енергії у системі «генерація – зберігання – споживання – мережа» під впливом регуляторних, технологічних і кліматичних факторів, а також методи керування навантаженнями і мікрокліматом для зниження питомих витрат електроенергії.

Наукова новизна роботи полягає у:

1) розробленні узагальненої методики багатокритеріальної оптимізації режимів роботи домогосподарства, що поєднує керування мікрокліматом теплиць, планування технологічних процесів підготовки кормів і керування зарядом/розрядом накопичувачів за умов волатильної PV-генерації;

2) формуванні підходу до синтезу керованих графіків навантажень на основі адаптивних тарифно-метеорологічних предикторів і нормативних обмежень приєднання генерувальних потужностей;

3) побудові еталонних профілів енергоспоживання для агропобутових господарств на основі процедур ДСТУ ISO 50002/50006, що забезпечує відтворюваність оцінки енерговтрат і ефектів від заходів.

Узгодження методики з українськими та адаптованими європейськими нормами щодо енергоефективності будівель (серія EN ISO 52000 та ін.) дає змогу інтегрувати результати в типові проєктні рішення [4; 5; 13; 14].

Практичне значення одержаних результатів визначається можливістю їх використання для інженерного проєктування та модернізації приватних господарств змішаного типу. Зокрема, методика дозволяє ідентифікувати найбільш навантажені ділянки енергоспоживання (насосні станції зрошення, системи вентиляції і опалення теплиць, електроприводи подрібнювачів і змішувачів кормів, освітлення виробничих і побутових зон) та сформулювати портфель технічних заходів: впровадження перетворювачів частоти для насосів і приводів, перехід на світлодіодне кероване освітлення, теплові екрани і рекуперацію у теплицях, оптимізацію графіків енергоємних операцій під час генерації електроенергії сонячної електростанцією, балансування через АКБ за умов дотримання вимог ДСТУ EN 62446-1 і ДСТУ EN 50549-1 [10; 11].

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 8 розділів, висновків, список використаних джерел (87 найменувань), 1 додаток.

Загальний обсяг розрахунково-пояснювальної записки – 102 сторінки.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДОМОГОСПОДАРСТВ

1.1 Сучасні підходи до енергоменеджменту у приватному секторі

Енергоефективність приватних домогосподарств розглядається сьогодні як системний процес безперервного вдосконалення, який поєднує технічні, організаційні та поведінкові заходи. Методологічним підґрунтям такого підходу є впровадження системи енергетичного менеджменту за стандартом ДСТУ ISO 50001:2020. Він встановлює вимоги до політики, планування, впровадження та постійного поліпшення результативності використання енергії, а також інтеграції енергетичних аспектів до загальної системи управління господарства. У комплексі з ISO 50001 застосовуються стандарти з енергоаудиту (ДСТУ ISO 50002), встановлення базових рівнів та показників енергоефективності (ДСТУ ISO 50006), що дозволяє кількісно оцінювати ефекти від заходів і порівнювати їх між собою. У будівельній частині будинку доцільно спиратися на методологію енергоефективності будівель, закріплену в ДСТУ EN ISO 52000-1:2023, яка задає єдині правила обчислення енергетичних показників будівель на рівні огорожувальних конструкцій, інженерних систем та місцевих джерел енергії. Водночас управління технічними системами доцільно будувати згідно з ДСТУ EN ISO 52120-1:2022, який систематизує функції автоматизації, регулювання та технічного менеджменту будівлі і оцінює їх внесок в енергетичну результативність. Застосування вказаних стандартів у приватному секторі забезпечує прозорість цілей, відтворюваність розрахунків і узгодженість технічних рішень між підсистемами, включно із власною генерацією та накопиченням енергії.

Сутнісною складовою сучасного енергоменеджменту є управління якістю електропостачання та відповідність приєднання власних генераторів вимогам мережі. Якість напруги у мережах загального користування нормується гармонізованим в Україні стандартом ДСТУ EN 50160:2023, а паралельна робота побутових генеруючих установок з мережею та вимоги до їх засобів

захисту – стандартом ДСТУ EN 50549-1:2022. Вимоги до електроустановок фотоелектричних систем під час монтажу та експлуатації визначено ДСТУ HD/IEC 60364-7-712, а належний стан документування та випробувань фотоелектричних систем (ФЕС) – ДСТУ EN 62446-1. Таке нормативне середовище дозволяє інтегрувати альтернативні джерела у приватному секторі на безпечних та прогнозованих умовах, а також забезпечує коректність вимірювань, планування та контроль експлуатаційних режимів.

1.2 Структура електроспоживання приватного будинку

Типова структура електроспоживання приватного будинку з теплицею та малими підсобними процесами (приготування кормів для свиней і великою рогатою худобою (ВРХ), насосні агрегати, вентиляція, освітлення, допоміжні приводи тощо) істотно відрізняється від структури міського домогосподарства через наявність цілорічних або сезонно-пікових технологічних навантажень. Для теплиць найвагомішими статтями енергоспоживання є теплозабезпечення, вентиляція, рециркуляція повітря, циркуляційні та поливні насоси, а також штучне освітлення (особливо за застосування світлодіодних систем із спектральним налаштуванням для опромінення рослин). За даними оглядових робіт для ЄС і Східної Європи, у висококліматизованих теплицях північної смуги домінує тепла складова (опалення), тоді як в теплицях із низьким енергетичним навантаженням у південній смузі спостерігається змішана картина з помітними частками електричного освітлення, вентиляції та зрошення. Усі ці навантаження тісно пов'язані з мікрокліматичними параметрами та режимами вирощування, що зумовлює доцільність впровадження моделей керування мікрокліматом і енергоспоживанням у складі систем керування теплицею [16].

У підсобних процесах приготування кормів специфічні витрати електроенергії формуються переважно стадіями подрібнення (молоткові або валкові млини), змішування та гранулювання або екструдуювання. Публікації для комбікормової промисловості вказують на типовий діапазон питомого

електроспоживання на рівні 40–60 $kWh\cdot год/m$ готової продукції із найбільш енергоємною операцією гранулювання (до 25 $kWh\cdot год/m$) та істотною часткою помолу. Енергозатрати змішувачів порівняно невеликі (порядку декількох одиниць $kWh\cdot год$ на цикл), але за високої інтенсивності виробництва їх сумарний внесок може бути відчутний [14; 15]. На практиці значення сильно залежать від гранулометричного складу, вологості сировини та режимів роботи приводу. Застосування частотнорегульованих електроприводів (ЧРП) для вентиляторів, насосів і млинів, оптимізація діаметрів сит і підвищення ефективності транспортування матеріалів знижують питомі витрати без негативного впливу на якість корму [17].

Побутова частина будинку (опалення, гарячого водопостачання (ГВП) за допомогою теплового насоса або електрокотла, холодильні установки, кухонні прилади, пральні машини, кондиціонери, електроніка, заряджання інструментів) створює базове, переважно добово-циклічне електричне навантаження. Загалом інтегрований енергопрофіль такого господарства характеризується:

- 1) сезонними піками через потреби теплиці (опалення взимку, освітлення восени і взимку, кондиціонування і полив улітку);
- 2) короткочасними «гребінчастими» піками від пусків електроприводів;
- 3) стабільним базовим побутовим навантаженням.

Це визначає технічну доцільність розмежування критичних і керованих навантажень у системі енергоменеджменту, впровадження пріоритетів, локального накопичення енергії та механізмів зсуву споживання поза години пікового навантаження мережі.

1.3 Огляд технологій підвищення енергоефективності

Енергоефективні електроприводи з ЧРП (VFD) є базовим інструментом зменшення споживання для вентиляторів, насосів, компресорів, млинів і змішувачів. Завдяки кубічній залежності потужності від швидкості у приводах із характеристиками опору типу «вентилятор–насос» навіть помірне зниження обертів дає пропорційно значну економію енергії, а також зменшує пускові струми

та механічне зношування агрегатів [14; 17]. У теплицях застосування ЧРП на циркуляційних та поливних насосах, вентиляторах рециркуляції і осушення дозволяє реалізовувати контури регулювання за вологістю, тиском і витратою з підвищеною точністю, зменшуючи перерегулювання та надлишкові втрати енергії [16]. Для млинів раціональний підбір сит, режимів завантаження і швидкості також безпосередньо впливає на питомі витрати [15; 17].

У частині освітлення перехід на LED-світильники з високою світловою віддачею і керованими драйверами (димінгом, ШІМ) забезпечує економію електроенергії порівняно з натрієвими та люмінесцентними лампами. У тепличних умовах додатково застосовуються спектрально-налаштовані LED-системи, що зменшують надлишкове опромінення та дозволяють регулювати фотоперіод залежно від фази росту. Інтеграція освітлення у загальний контур керування мікрокліматом (разом із тепловими завісами, вентиляцією та поливом) відповідно до ISO 52120-1 запобігає конфліктам між підсистемами та мінімізує сумарні витрати при дотриманні агротехнічних цілей [16].

Керування навантаженнями та моніторинг. Стандартизований підхід до енергоефективності будівель (ДСТУ EN ISO 52000-1) у поєднанні зі стандартом на автоматизацію будівель (ДСТУ EN ISO 52120-1) дає підстави виділяти щонайменше три рівні: польовий (датчики/приводи), рівень автоматизації і рівень диспетчеризації. Мінімально доцільний функціонал для приватного господарства: погодинний облік і візуалізація, виявлення аномалій (алгоритми «базового споживання»), пріоритизація навантажень, протиаварійна логіка (відсічення некритичних споживачів при обмеженнях потужності), а також інтеграція власної генерації, накопичувачів та керування заряджанням. Додатковий ефект дає впровадження профілактичного обслуговування за станом для приводів та вентиляторів.

1.4 Альтернативні джерела енергії для приватного господарства

Фотоелектричні системи. Для приватного сектору ФЕС забезпечують денну генерацію, що добре корелює з літньо-весняними навантаженнями

теплиці (вентиляція, полив) та частково покриває побутові потреби. Проектування та монтаж мають відповідати вимогам розділу 7-712 стандартів серії 60364 (ДСТУ HD 60364-7-712:2022 або ДСТУ ІЕС 60364-7-712:2019), зокрема щодо прокладання DC-ланцюгів, захисту від дугових замикань, селективності захистів і вимог до відключення постійного струму; приймання в експлуатацію, перевірки і документування визначаються ДСТУ EN 62446-1. Для паралельної роботи з мережею інвертор і захисти мають відповідати ДСТУ EN 50549-1, а експлуатація – параметрам якості напруги за ДСТУ EN 50160. Теоретичні засади оцінювання генерації, тіньовий аналіз і підбір конфігурації детально викладені в сучасних підручниках і монографіях з ФЕС.

Малі вітроенергетичні установки (ВЕУ). Доцільні на відкритих, незатінених ділянках з підтвердженими вітровими ресурсами. Вимоги безпеки, проектування і випробувань малих ВЕУ регламентуються ДСТУ EN 61400-2:2022; для загальної розробки вітроустановок діє ДСТУ EN ІЕС 61400-1, а вимірювання електричної потужності – ДСТУ EN 61400-12-1. Через високу варіабельність ресурсу та механічні навантаження особливого значення набувають правильний вибір класу турбіни, вібраційна діагностика і відповідність вимогам ОСР щодо паралельної роботи.

Біогаз для малих господарств. Органічні відходи тваринництва утворюють стабільну сировинну базу для анаеробного збродження з одержанням біогазу, що може бути використаний у котлах або мікро-ТЕЦ. Методичні підходи до оцінки ресурсів і включення біоенергетики в агровиробництво напрацьовані рекомендації, які підкреслюють необхідність технологічної та економічної збалансованості проєктів і врахування сезонності. Для підключення електричної частини мікро-ТЕЦ діють такі самі правила паралельної роботи з мережею, що і для ФЕС і ВЕУ (EN 50549-1), а газова частина – правилам безпечної експлуатації обладнання на газоподібному паливі та місцевим приєднувальним умовам оператора ГРМ.

Теплові насоси. Для опалення та ГВП приватних будинків і низькотемпературних систем підігріву теплиць теплові насоси (повітря–вода,

грунт–вода) забезпечують високі сезонні коефіцієнти перетворення. Вимоги до сезонних випробувань і декларування сезонної ефективності (SCOP/SEER) регламентує ДСТУ EN 14825:2024 (гармонізує EN 14825:2022), що забезпечує зіставність енергоефективності різних моделей у реальних кліматичних умовах. Правильна інтеграція з теплицею (низькотемпературні контури, теплові завіси, акумуляція тепла) дозволяє знизити пікові навантаження і перенести частину споживання поза них.

Сонячні теплові колектори (СТК). Для підготовки ГВП та низькотемпературних процесів у теплиці (підґрунтове опалення) доцільно застосовувати плоскі або вакуумні колектори. Методи випробувань і оцінки характеристик гармонізовані в Україні стандартом ДСТУ EN ISO 9806:2019, що замінив попередні видання ISO 9806-1/-2/-3. Проектні рішення на основі довідників і підручників з сонячної теплотехніки дають змогу технічно збалансувати СТК і теплові насоси (гібридні системи) з урахуванням клімату, геліопотенціалу та навантажень [15].

Висновки з розділу 1

Узагальнюючи, сучасна нормативно-правова база в Україні дозволяє приватному господарству легально та безпечно впроваджувати альтернативну генерацію (ФЕС/ВЕУ/біоенергетика), теплові насоси і системи автоматизації, забезпечуючи сумісність з мережами та достовірність енергетичного обліку. Теоретичні та інженерні засади прийняття рішень формуються поєднанням методології енергоефективності будівель і ISO 50001, а також галузевих знань з сонячної енергетики, теплотехніки, вітроенергетики і агроінженерії [29]. Це створює підстави для розроблення у подальших розділах роботи узгоджених техніко-економічних рішень щодо оптимізації навантажень, підбору і розміщення обладнання та інтеграції альтернативних джерел енергії у приватному домогосподарстві.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ГОСПОДАРСТВА

2.1 Загальна схема та енергетична інфраструктура господарства

Досліджуваний об'єкт – індивідуальне домогосподарство сільського типу з житловим будинком площею близько 150 м², прибудинковими господарськими спорудами, однією плівково-каркасною теплицею площею 96 м² та окремою дільницею механізованого приготування кормів для свиней і великої рогатої худоби (ВРХ). Електропостачання – приєднання до мережі 0,4 кВ за трифазною схемою 3×230/400 В, 50 Гц, із типовою договірною дозволеною потужністю до 16 кВт для першого ступеня стандартного приєднання побутового споживача. За необхідності збільшення встановленої потужності до 50 кВт застосовуються умови другого ступеня згідно з Кодексом систем розподілу НКРЕКП. В Україні чинною є редакція EN 50160:2022, гармонізована як ДСТУ EN 50160:2023, яка визначає характеристику напруги в мережах загального користування та допустимі відхилення 230/400 В ±10 % для низької напруги; саме на ці межі спирається формування вимог щодо якості електроживлення у проєкті.

Склад основних електроприймачів будинку включає електроплиту, холодильне обладнання, пральні та посудомийні машини, циркуляційні насоси систем опалення та ГВП, побутову електроніку, а також побутове та фасадне освітлення. Середньостатистичне електроспоживання домогосподарства в Україні становить 170 кВт·год на місяць, із вираженими ранішньо-вечірніми піками навантаження та «нічними» провалами, що зумовлено поведінковими патернами побутового використання техніки [19–21].

До складу енергетичної інфраструктури тепличного комплексу входять електроприводи систем мікроклімату (вентилятори, приводи кватирок), циркуляційні та поливні насоси (система фертигації), установки для досвітки рослин, автоматика контролю клімату, для автономного теплопостачання – електроживлення допоміжних агрегатів (пальники, циркуляційні насоси, блоки керування тощо). Дільниця приготування кормів обладнується дробаркою-подрібнювачем, міксером-змішувачем, гранулятором (пелет-

пресом), живильниками-подавальниками, транспортером та допоміжними механізмами. Одиничні потужності електроприводів у малому підсобному виробництві становлять: 10,5 *кВт* для дробарки, 4 *кВт* для змішувача, 18 *кВт* для гранулятора; енергоємність власне операції гранулювання коливається у діапазоні 50–100 *кВт·год/т* і суттєво залежить від вологості, рецептури та геометрії матриці [28; 35].

Система водопостачання базується на свердловині з занурюваним електронасосом потужністю 1,0 *кВт* та акумулювальною ємністю. зрошення теплиці виконується через краплинні контури з колектором та дозуючим вузлом фертигації. Водовідведення – через локальні очисні споруди/септик з дренажним насосом потужністю 0,8 *кВт*. Підбір і експлуатація насосного обладнання здійснюються з урахуванням рекомендацій виробників насосів і керівництв з енергоефективності зрошення, зокрема щодо роботи в області ККД насоса та застосування частотного регулювання для змінних витрат [29; 30].

Для забезпечення належного обліку та контролю параметрів електроживлення передбачається вузол обліку з лічильником, що відповідає ДСТУ EN IEC 62052-11:2021 та ДСТУ EN IEC 62053-21:2022, а для інструментального моніторингу якості електроенергії – вимірювання параметрів класу A/S відповідно до ДСТУ EN 61000-4-30:2022 у точках вводу та на групових лініях найбільш відповідальних споживачів.

2.2 Теплиця

Теплиця має один проліт шириною 8 м і довжиною 12 м (загальна площа близько 96 м²), орієнтована довгою віссю захід-схід для раціонального використання природної інсоляції. Конструкція – легкий сталеалюмінієвий каркас із подвійним UV-стабілізованим поліетиленом або стільниковим полікарбонатом, з тамбуром і завісами, бічними кватирками та верхньою вентиляцією. Технологічний процес включає підготовку розсади, висаджування, підтримання мікроклімату з контролем температури, відносної вологості, CO₂ та фотоперіоду, фертигацію і захист рослин. Рекомендовані

діапазони температур і вологості для овочевих культур у помірно опалюваній теплиці беруть за фаховими керівництвами: денні 22 °C та нічні 15 °C для томата і огірка, відносна вологість 60–80 %, концентрація CO₂ на рівні фону або до 900 ppm при інтенсивних технологіях. Система освітлення комбінована, із використанням природного освітлення та короткотривалого штучного досвічування в осінньо-зимовий період [22; 23].

Планується перехід від натрієвих ламп високого тиску до світлодіодних (LED) фітоламп з питомою світловою ефективністю 3 мкмоль/Дж. За сучасними експериментальними та оглядовими даними для теплиць із додатковою досвіткою перехід від натрієвих ламп високого тиску до LED забезпечує орієнтовне зниження електроспоживання на 30–40 % за незмінної продуктивності або її підвищенні завдяки точнішому спектральному налаштуванню [24; 25]. На даний момент для теплиці встановлена потужність системи досвітки складає 80 Вт/м² залежно від культури. при площі 96 м² це становить 7,68 кВт, що в опалювальний сезон формує домінуючу частку електричного навантаження у вечірні та ранкові години. Режим роботи систем мікроклімату визначається погодними умовами та фазою росту: вентиляція та рекуперація вологи застосовуються для утримання вологості нижче 85 %, щоб запобігти конденсації та розвитку хвороб, а автоматизація керування виконується відповідно до принципів керування будівлями за ISO 52120-1 з локальними температурно-вологісними датчиками та лінійним або ступінчастим законом керування виконавчими механізмами [24; 25].

2.3 Дільниця приготування кормів для свиней і ВРХ

Процесна схема включає приймання і тимчасове зберігання зернових компонентів, попереднє очищення, подрібнення у молотковій дробарці, дозування та змішування з мінерально-вітамінними добавками, за потреби – гранулювання на кільцевому пелет-пресі, охолодження, просівання гранул і транспортування готового корму. Добовий випуск складає 0,3 т комбікорму з періодичною роботою лінії 2 год/день. Енергетично найбільш навантаженими

операціями є подрібнення та гранулювання. Останнє характеризується типовою питомою витратою електроенергії 50–100 $\text{kWh}\cdot\text{год}/\text{т}$ (залежно від вологості, рецептури, геометрії матриці, розміру сит) [35].

Номенклатура обладнання у господарстві:

- 1) молоткова дробарка 10,5 kWh із ситами 3 мм;
- 2) горизонтальний лопатевий змішувач 4 kWh з часом циклу 6 хв;
- 3) пелет-прес 18 kWh (діаметр матриці 200 мм; компресійне відношення $L/D=8$);
- 4) охолоджувач-просіювач 1 kWh ;
- 5) транспортер шнековий 1,5 kWh .

Загальна встановлена потужність дільниці – 35 kWh , проте завдяки послідовно-циклічній роботі агрегатів середня одночасна потужність у зміні становить 14 kWh , що дозволяє уникнути перевищення договірної потужності за умови керування графіками навантаження та застосування частотного керування на критичних приводах. Для освітлення та локального пилопригнічення доцільні LED-світильники IP65 і аспірація з фільтрувальними модулями, зниження енергоємності – завдяки раціональному розташуванню силових кабель-каналів, коротким транспортувальним лініям і профілактиці підвищених механічних втрат у редукторах. Антипилові заходи одночасно покращують пожежну безпеку та зменшують приховані втрати продукції.

2.4 Дані режимів енергоспоживання господарства

Середньомісячні параметри енергоспоживання. Базове побутове споживання електроенергії без урахування теплиці та кормоприготування – близько 170 $\text{kWh}\cdot\text{год}/\text{міс}$. ($\approx 5,6 \text{ kWh}\cdot\text{год}/\text{добу}$). Характерні піки електроспоживання 07:00–09:00 та 18:00–22:00, провал 00:00–05:00. У тепличному комплексі взимку домінує електроспоживання досвітки: для встановленої потужності 6 kWh та середньої тривалості роботи 4 $\text{год}/\text{добу}$ середньодобове споживання становить $\sim 24 \text{ kWh}\cdot\text{год}$, або 720 $\text{kWh}\cdot\text{год}/\text{міс}$ у

пікові місяці. Поза сезоном досвічування відсутнє. Насосні агрегати поливу працюють у 1 год/добу у період вегетації з добовим споживанням близько $1 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Дільниця приготування кормів, за випуску $0,3 \text{ т/добу}$ із гранулюванням, споживає орієнтовно $25 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$ (враховуючи потужність гранулятора, дробарки і транспортування) у ті дні, коли відбувається виробництво. При роботі 3 дні на тиждень середньомісячний внесок становить $300 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Сумарний річний профіль має виражену сезонність: зростання в IV–I кварталах за рахунок досвітки та зменшення у травні–вересні.

Погодинні профілі формуються за даними багатотарифного лічильника активної електроенергії (клас точності 1.0) відповідно до ДСТУ EN IEC 62053-21:2022 та протоколів зчитування даних. Для аналізу якості електроенергії застосовується аналізатор параметрів класу A/S за ДСТУ EN 61000-4-30:2022 з інтервалом дискретизації 15 хв і реєстрацією подій. Облік води для аналізу енергоємності водопостачання та зрошення виконується за допомогою лічильників води, гармонізованих із ДСТУ EN ISO 4064-2 та ДСТУ EN ISO 4064-5, що дозволяє коректно визначити питомі витрати електроенергії на 1 м^3 поданої води.

Для нормування та приведення даних застосовується метеокорекція за градусо-добами опалення та інсоляцією, а для оцінки потенціалу власної генерації – розрахунок сонячних ресурсів за відкритими картами Global Solar Atlas для України. Типові значення вихідної потужності близько $3,0 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{кВт}\cdot\text{добу})$, тобто близько $1100 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{кВт}\cdot\text{рік})$ для північних регіонів країни (Сумська обл.) [26–28].

У табл. А.1 подано перелік технологічного обладнання, розміщеного у приватному домогосподарстві.

2.5 Методика енергетичного обстеження

Енергетичне обстеження проводиться відповідно до ДСТУ ISO 50002:2016 «Енергетичні аудити. Вимоги з керівництва», із

формуванням плану вимірювань, визначенням меж системи, енергоносіїв, істотних енерговикористань (SEU) та розробленням моделей енергоспоживання. Паралельно встановлюються показники енергетичної ефективності. Для домогосподарства такі показники доцільно формувати окремо для побутової частини, теплиці та дільниці кормоприготування з урахуванням сезонності та виробничих графіків [33–36].

Перша стадія – документальний аудит: збір рахунків за електроенергію, технічних умов приєднання, паспортів обладнання, попередніх актів випробувань та налаштування. Друга – інструментальний аудит: встановлення лічильника із телеметрією або зчитувача профілів навантаження, монтаж портативних аналізаторів якості електроенергії на ввідному розподільчому щиті та у підрозділах (теплиця, кормодільниця), встановлення лічильників води на головному водопроводі. Для насосів та приводів застосовується тимчасове вимірювання споживання за допомогою струмових кліщів, з подальшим екстраполюванням на типовий цикл. Третя – моделювання та баланс: агрегування погодинних профілів у тижневі та сезонні репрезентативні тижні, нормування на погодні фактори та виробничі обсяги, складання енергобалансу за підсистемами з ідентифікацією втрат і потенціалів економії.

Якість напруги та симетрії фаз оцінюється на відповідність ДСТУ EN 50160:2023. У випадку виявлення частих провалів напруги або перевищення гармонік розглядаються заходи щодо компенсації реактивної потужності, фільтрації гармонік, оптимізації запусків великих приводів і впровадження плавного регулювання з частотними перетворювачами. Для насосних систем і ліній електроприводів порівнюються робочі точки з рекомендованими виробником областями ККД, коригується гідравлічний режим (тиск, витрата), оптимізується діаграма вмикань протягом доби [29; 30].

Під час оцінки потенціалу власної генерації формується попередній розрахунок для дахової ФЕС 5–10 *кВт* на основі відомих кліматичних даних. Для теплиці аналізується заміна систем доświetки на LED з прогноною

економією 30–40 % електроенергії, а також можливість модернізації керування мікрокліматом за принципами ISO 52120-1.

Загалом описана методика забезпечує відтворюваність вимірювань, порівнюваність сезонних даних і коректну постановку цільових показників енергоефективності для трьох функціональних підсистем об'єкта – житлової, тепличної та кормоприготувальної.

Висновки з розділу 2

Розділ формує повну картину енергетичної інфраструктури домогосподарства з теплицею і дільницею кормоприготування, окреслює типові профілі навантаження, методику обстеження та принципи формування базового енергобалансу.

Теплиця є найбільшим споживачем електричної енергії, тому для цієї підсистеми розглянуті енергозберігаючі заходи на основі сучасних алгоритмів керування мікрокліматом, переходу на енергоефективні джерела світла та застосування VFD у насосних і вентиляторних приводах.

3 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ ТА БАЗОВИЙ ЕНЕРГОБАЛАНС ГОСПОДАРСТВА

3.1 Аналіз профілів навантаження

Погодинні ряди споживання сформовані за даними багатотарифного лічильника класу точності 1.0 із інтервалом інтеграції 15 хв та агреговані у добові та помісячні профілі відповідно до методики енергетичного аудиту для малих об'єктів розподіленої генерації та споживання. Для репрезентативного «зимового пікового дня» використано добовий профіль, у якому домінантами навантаження є досвітка теплиці натрієвими лампами високого тиску (HPS) 7,68 кВт у вікнах 06:00–08:00 та 17:00–19:00, а також циклічна робота ділянки приготування кормів (14 кВт у вікні 10:00–12:00). У денний час працюють вентилятори мікроклімату теплиці (0,6 кВт), у післяобідній період – насос поливу (1,1 кВт, короткі інтервали). Цілодобово працюють холодильник і морозильна камера зі стохастичними циклами компресорів.

Для цього дня зафіксовано добову електроємність $E_d \approx 110 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ та максимум активної потужності $P_{\max} = 14,8 \text{ кВт}$. Коефіцієнт заповнення графіка навантаження визначено як

$$k_{\text{зан}} = \frac{E_d}{P_{\max} \cdot 24} = \frac{110}{14,8 \cdot 24} \approx 0,31, \quad (3.1)$$

що характерно для побутово-виробничих об'єктів із вираженими ранково-вечірніми піками.

За результатами енергетичного обстеження об'єкту і виконання вимірювань споживання електроенергії у приватному домогосподарстві зі встановленим обладнанням відповідно до переліку, поданому у табл. А.1, було побудовано графіки навантажень об'єкту для найбільш навантаженого відповідного періоду: річний – рис. 3.1; місячний – рис. 3.2; добовий – рис. 3.3.

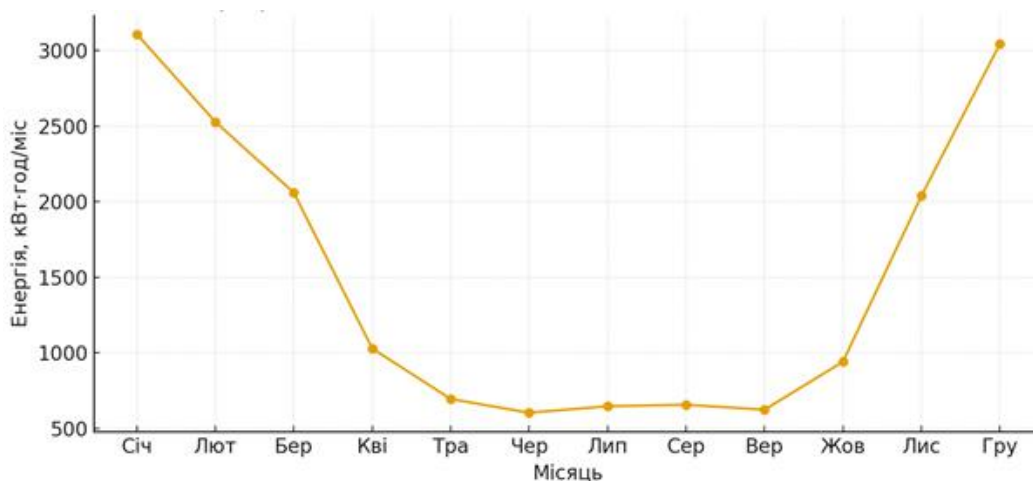


Рисунок 3.1 – Річний графік навантаження об'єкту

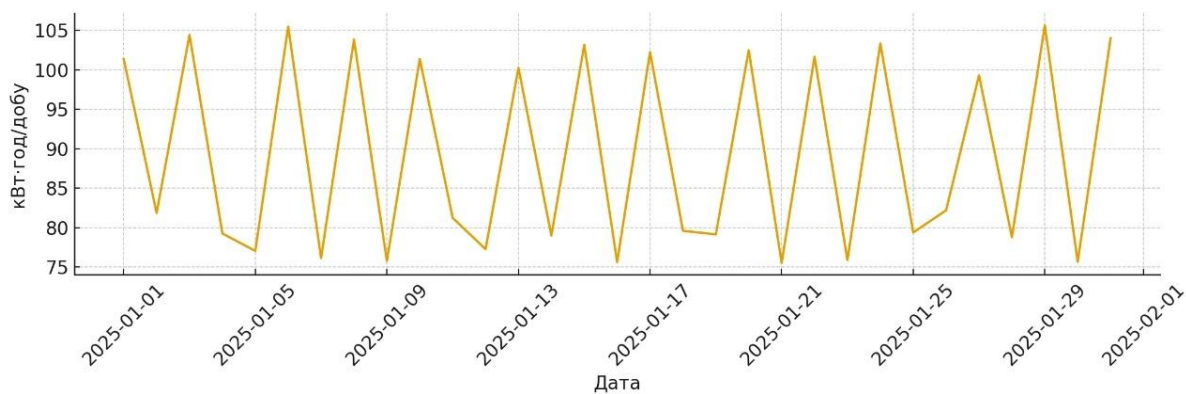


Рисунок 3.2 – Місячний графік навантаження об'єкту (для січня)

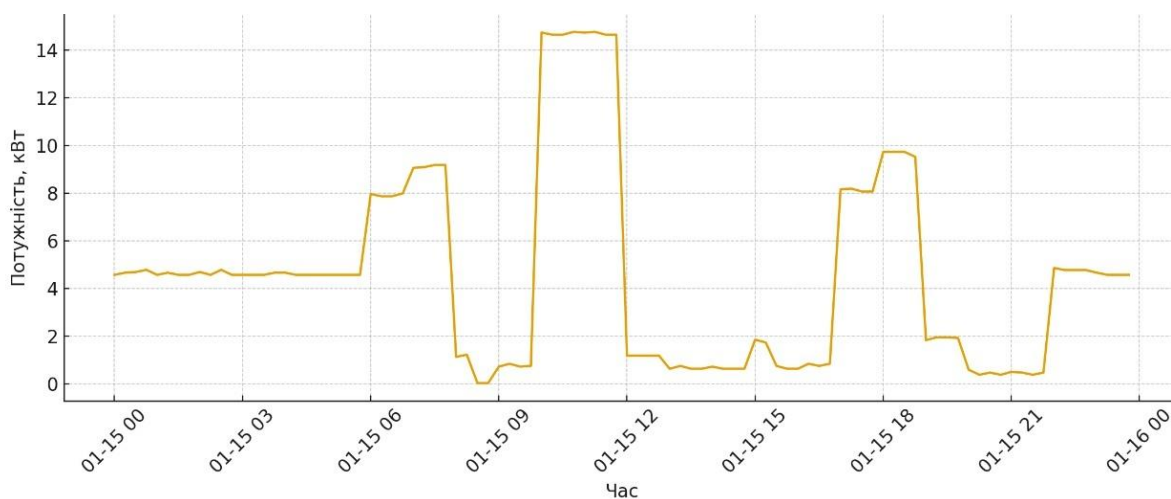


Рисунок 3.3 – Добовий графік навантаження об'єкту (на 15.01.25 р.)

Графік річного навантаження побудований на підставі річного споживання приватного домогосподарства, поданого у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Структура річного електроспоживання об'єкту, кВт· год

Місяць	Побутові (інші)	Освітлення загальне	Холодильник	Морозильна камера	Досвічування теплиці	Мікроклімат / вентиляція	Опалення теплиці	Кормопех	Полив / водопостачання	Разом
Січень	100,9	43,8	21,2	23,8	1339,2	148,8	1125	317,5	15,5	2778,9
Лютий	111,7	39,4	19,2	21,5	907,2	134,4	1012,5	279,8	14	2236,3
Березень	94,7	36,8	21,2	23,8	669,6	186	787,5	296,4	21,7	1746,6
Квітень	113,6	31,1	20,5	23	0	180	450	283,4	21	1127,2
Травень	113,9	28,3	21,2	23,8	0	223,2	112,5	327,7	31	827,8
Червень	106,4	29,9	20,5	23	0	216	0	275,6	30	703,5
Липень	95,9	30,1	21,2	23,8	0	223,2	0	275,6	31	701,5
Серпень	106,3	31,1	21,2	23,8	0	223,2	0	309,8	31	745,1
Вересень	101	30,5	20,5	23	0	216	0	275	30	745,8
Жовтень	110,3	34,7	21,2	23,8	669,6	186	337,5	303,5	21,7	1371,6
Листопад	114,8	40,1	20,5	23	907,2	180	787,5	314,5	15	2000
Грудень	99,9	45,5	21,2	23,8	1339,2	148,8	1068,7	307,6	15,5	2584,3
Рік	1269,4	421,3	249,6	280,1	5832	2265,6	5681,2	3566,4	277,4	17568,6
В.о., %	7,2	2,4	1,4	1,6	33,2	12,9	32,3	20,3	1,6	100,0

Аналізуючи річне електроспоживання об'єкту можна чітко відслідкувати кількаразове його зростання у зимові місяці та весняно-осінній період, що, у першу чергу, пов'язано із забезпеченням роботи теплиці (досвічування, опалення, вентиляція тощо).

Нерівномірність місячного енергоспоживання визначається періодичною (не щоденною) роботою енергоємного технологічного обладнання з приготування кормів.

На добовому графіку, побудованого для найбільш навантаженого зимового періоду, можна побачити характерні вранішній і вечірній максимуми, а також суттєве збільшення споживання у обід. Вранішній і вечірній максимуми пов'язані з підсвічуванням рослин у теплиці та роботою іншого

побутового обладнання, включаючи загальну систему освітлення. Обідній максимум пояснюється роботою технологічного обладнання з приготування кормів та системи підтримання мікроклімату. У нічний час навантаження визначається переважно роботою системи електропідігріву теплиці з пріоритетом роботи у нічний час.

Виходячи з аналізу структури енергоспоживання об'єкту можна зробити висновок, що найбільша частка доводиться на опалення телиці (32,3 %), досвічування рослин (33,2 %) та роботу технологічного обладнання у кормоцеху (20,3 %), тому саме на них, у першу чергу, треба спрямувати заходи з енергозбереження.

Зниження денних піків може бути досягнуто нічним пріоритетом опалення, що особливо критично для дотримання ліміту приєднаної потужності 16 *кВт* (перша ступінь стандартного приєднання за Кодексом систем розподілу НКРЕКП). Для альтернативного сценарію з ґрунтовим тепловим насосом (ТН) зі щомісячним $COP = 3,4-4,5$ нічний профіль зберігається; електричні витрати на опалення зменшуються, але форма добового графіка змінюється лише в нічному «кориті» (заміна електропідлоги на електроживлення ТН при такій самій теплопродуктивності).

3.2 Аналіз основних електроприймачів об'єкту

На основі переліку обладнання (будинки, теплиця, кормоцех, насосні та холодильні агрегати) і часових режимів роботи виділено групи навантажень із різною енергетичною структурою:

– досвічування теплиці НПС: встановлена потужність $P_{inst} = 10,8 \text{ кВт}$. Тривалість роботи у пік-сезоні – 4 год/добу (2+2 год), середнє добове енергоспоживання близько 43,2 *кВт·год* залежно від сезону. Коефіцієнт завантаження протягом доби $k_{завд} = \frac{t_{роб}}{24} = \frac{4}{24} = 0,167$. Стартові процеси з високими пусковими струмами відсутні (електронні ПРА), проте характерна наявність вищих гармонік струму [39; 60];

– мікроклімат теплиці (вентилятори, приводи квартир): типова потужність вентиляторів $0,6\text{кВт}$, тривалість роботи $8\text{--}12\text{ год/добу}$ залежно від сезону; $E_{\text{доб}} = 4,8\text{--}7,2\text{кВт}\cdot\text{год}$. За наявності перетворювачів частоти (ПЧ) коефіцієнт завантаження високий, пуски двигунів плавні, однак зростає внесок гармонік;

– полив: насос потужністю $1,1\text{ кВт}$, електроспоживання $0,5\text{--}1,0\text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$ (короткі цикли вдень). Питомі витрати енергії оцінюють як $e_{\text{год}} = E/V = 0,8/6,5 = 0,123\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, де V – добовий об’єм подачі води згідно даних лічильників води за ДСТУ EN ISO 4064;

– кормоцех: агрегати, що створюють найбільше навантаження – гранулятор 18 кВт , дробарка $10,5\text{ кВт}$, змішувач 4 кВт ; середня одночасна потужність у зміні близько 14 кВт ; добове енергоспоживання у виробничі дні близько $25\text{кВт}\cdot\text{год}$;

– побутові навантаження: ранково-вечірні пуски мікрохвильових та електропечей/чайників/пральних машин тощо; LED-освітлення будинку та підвір’я. Середньомісячне електроспоживання складає близько $20\text{ кВт}\cdot\text{год}$. Холодильник і морозильна камера працюють постійно-періодично. Річні витрати електроенергії на їх роботу складають близько 250 та $280\text{ кВт}\cdot\text{год}$ відповідно (класи ЕЕІ С–Е). Ці навантаження забезпечують «фоновий» рівень споживання з дрібною «зернистістю» профілю;

– опалення теплиці: у базовому варіанті – електропідлога із нічним пріоритетом роботи. У перспективі планується заміна на використання ТН «грунт–вода» з електроспоживанням $E_{\text{ел}} = E_{\text{тепл}} / \text{COP}_m$, де COP_m – коефіцієнт термотрансформації ТН; на даний момент найкраще співвідношення ціна–якість мають ТН з $\text{COP} = 3,4\text{--}4,5$ (В0/В35 у холодні/теплі місяці).

Для аналізу електроприймачів застосовано методику дослідження графіків навантаження, побудованих для найбільш навантаженого місяця року та найбільш навантаженої доби у цьому місяці, зіставлених із журналами експлуатації. Режимми пусків та простоїв агрегатів кормоцеху підтверджуються

характерними підвищеннями миттєвої потужності та коефіцієнта дисперсії о 10–12-ій годинах дня (рис. 3.2).

3.3 Втрати в електричній мережі та якість електроенергії

Внутрішня мережа 0,4 кВ побудована радіально з груповими лініями на теплицю, кормоцех, насосні та житлову частину. Активні втрати у лініях та з'єднаннях оцінені шляхом вимірювання струмів і напруги та моделюванням $P_{\Sigma} = \sum R_i I_i^2$ (оцінка перерізів і довжин за план-схемою). Для типових довжин і перерізів втрати у межах 3 % річного споживання вважаються припустимими.

Якість електроенергії у точці приєднання оцінено за класом вимірювань A/S відповідно до ДСТУ EN 61000-4-30:2022 із реєстрацією подій просідань та перенапруг, аналізом частотних складових. Вимоги до характеристик напруги у мережах загального користування задає гармонізований ДСТУ EN 50160:2023 (230/400 В ± 10 % для низької напруги). Несиметрія фаз у точці вводу зумовлена переважно однофазними побутовими навантаженнями та роботою ПЧ середньої потужності. Рекомендується коректне розподілення фаз по групах навантажень, уникнення «перекоосу» при пусках електроприводів кормоцеху, застосування трифазних варіантів приводу там, де це можливо. Вищі гармоніки струму пов'язані з електронними ПРА НПС та ПЧ вентиляційних систем і насосів. Для їх зниження у разі потреби застосовують фільтри та ПЧ із активними випрямлячами. Підтримання належного cos ϕ для трифазних споживачів (зокрема приводів кормоцеху) досягається вибором двигунів класів IE3–IE5 із коректованим реактивним струмом і/або застосуванням компенсації реактивної потужності на шині 0,4 кВ.

3.4 Базовий енергобаланс

Базовий енергобаланс сформовано шляхом агрегування добових і помісячних профілів за статтями споживання, із виокремленням домогосподарства (побутові навантаження, освітлення, холодильна техніка), теплиці (досвітка, мікроклімат, полив, опалення), кормоцеху та насосних

агрегатів. Для «найнавантаженішого місяця» (січень) розподіл виглядає так (табл. 3.1):

- теплиця – досвічування НПС: 30–35 % добового/місячного балансу у пікові зимові місяці ($43,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$; $1,34 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{міс}$);
- опалення теплиці: 30–35 % у зимові місяці з електропідлогою ($36,3 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$; $1,12 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{міс}$);
- кормоцех: 15–20 % у середньому за місяць із періодичним навантаженням під час робочих днів ($\approx 25 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$, три дні на тиждень; близько $0,30 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{міс}$).
- мікроклімат теплиці (вентиляція/приводи): 10–15 % ($4,8\text{--}7,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$ залежно від сезону).
- полив: 1–3 % ($0,5\text{--}1,0 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$ взимку, до $1,0 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$ влітку).
- домогосподарство (побутові інші + освітлення будинку і господарства): 10–15 % із сезонною нерівномірністю (взимку освітлення $30\text{--}45 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{міс}$ сумарно, улітку $10\text{--}20 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{міс}$).
- холодильник і морозильна камера: сумарно $530 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ ($44 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{міс}$ у середньому; взимку частка відносно більша, абсолютне споживання стабільне).

Висновки з розділу 3

Сукупний річний баланс становить близько $17,57 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$. Коефіцієнти нерівномірності добових навантажень у найбільш навантажених зимових місяцях формуються здебільшого графіком роботи кормоцеху, тоді як зміна навантаження у інші періоди року обумовлені тривалістю досвітлювання та погодними умовами (опалення, вентиляція). Втрати у внутрішній мережі (до 3 %) та вплив якості електроенергії не змінюють розподілу за складовими, але важливі для точності довгострокового моніторингу та виявлення прихованих неефективностей (перекіс фаз, недовантаження двигунів, робота поза робочими точками насосів).

4 ТЕХНІЧНІ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Розглянуті нижче рішення спрямовані на зменшення найбільших витрат на електроспоживання у домогосподарстві зі змішаними побутово-аграрними навантаженнями: опалення та ГВП, технологічні процеси теплиці (досвітка, мікроклімат, полив тощо), підготовка кормів, водопостачання, відведення, штучний холод та кондиціонування, а також системні втрати на реактивну потужність і відсутність моніторингу. Заходи сформовано з урахуванням сучасних підходів до енергоменеджменту, гармонізованих стандартів України та ЄС.

У даний час рекомендується застосування таких способів енергозбереження: для електроприводів – високоефективні двигуни класів IE3–IE5 і перетворювачі частоти з керуванням; для систем освітлення – світлодіодні джерела з автоматичним керуванням; для систем опалення і вентиляції – теплові насоси, рекуперацію тепла, екранування, ефективну теплоізоляцію; для електричних мереж – вимірювання та керування відповідно до ДСТУ EN IEC 62052-11, ДСТУ EN 62053-21 та вимог якості напруги ДСТУ EN 50160:2023. Сезонні показники ефективності систем теплопостачання та кондиціонування оцінюють відповідно до EN 14825 (SCOP/SEER).

4.1 Житловий будинок

Комплексна модернізація будинку передбачає термомодернізацію огорожувальних конструкцій (мінімізація інфільтрації, теплових містків), перехід на низькотемпературні системи опалення та ГВП із тепловими насосами повітря-вода або ґрунт-вода та впровадження системи керування навантаженнями (HEMS) з автоматизованим обліком (AMR/AMI). Сезонну ефективність теплових насосів визначають за EN 14825 як SCOP/SEER, що дозволяє порівнювати реальну сезонну продуктивність різних агрегатів у відповідних кліматичних профілях [61]. Для внутрішнього освітлення

застосовують світлодіодні світильники з датчиками присутності або освітленості, проєктування та нормування – за ДСТУ EN 12464-1, енергетичні вимоги – за ДСТУ EN 15193-1. У зовнішніх зонах ділянки освітлення регулюють астротаймерами з урахуванням ДСТУ EN 12464-2.

У частині вимірювання і аналітики доцільно встановити багатотарифні лічильники класу точності за ДСТУ EN 62053-21 у складі системи AMR з інтервальним профілюванням потужності. Дані HEMS зчитують у реальному часі, застосовують алгоритми NILM для розділення навантажень і виявлення «енергетичних аномалій» (паразитні споживання, деградація обладнання) [55]. Для захисту і довговічності побутових приладів та електроніки важливо забезпечити якість напруги в межах ДСТУ EN 50160:2023 та актуалізованих вимог НКРЕКП щодо переходу на 230/400 В і допустимих відхилень $\pm 10\%$ [42].

4.2. Тепличне господарство

4.2.1 Досвітлювання рослин

Перехід від ламп ДНаТ (HPS) до LED забезпечує суттєве скорочення електроспоживання завдяки більшій світловій ефективності, можливості димінгу та вибору ефективного для умов вирощування рослин залежно від фази росту спектру [46, 48]. Сучасні дослідження акцентують на керуванні спектром (червоний/синій/білий/далекий червоний) для оптимізації фотосинтезу і морфогенезу, що дозволяє зменшити годинну густину фотосинтетичного потоку при збереженні продуктивності [45, 49, 59]. За рахунок димінгу та адаптивних фотоперіодів під погодні умови і вибору часу роботи залежно від тарифних умов додатково зменшуються пікові навантаження і витрати [48, 49]. Внаслідок меншого тепловиділення світильників LED необхідно узгодити календар досвітлювання з тепловим балансом теплиці (компенсація тепла системою опалення), але сумарно енерговитрати на одиницю продукції за грамотною стратегією керування знижуються [48, 54, 63]. Нормативні вимоги до освітлення робочих місць обслуговуючого персоналу залишаються у межах ДСТУ EN 12464-1/-2.

4.2.2 Керування мікрокліматом

Повітрообмін, рециркуляція та екранування визначаються вимогами агротехнології та вологотепловим балансом. Вентилятори і приводи жалюзі оснащують перетворювачами частоти; для відцентрових вентиляторів енергоспоживання змінюється приблизно пропорційно кубу швидкості, що забезпечує кратні заощадження за часткового навантаження [40, 41, 53]. Екрани та термоштори (одинарні/подвійні) істотно зменшують нічні втрати, згладжують піки теплового навантаження і дають економію палива та електроенергії на десятки відсотків залежно від матеріалу, стратегії закривання та культури [43, 44, 62].

4.2.3 Система теплопостачання

Для низькотемпературних систем обігріву теплиць доцільні теплові насоси з оцінкою сезонної ефективності за EN 14825 (SCOP), із гідравлічним розподілом на контури повітряного обігріву. Рекуперація тепла з витяжного повітря, тепла конденсації і тепла від працюючого обладнання зменшує еквівалентне споживання первинної енергії. Енергозберігальні екрани, як зазначено вище, виконують функцію нічної термоізоляції, скорочуючи потоки випромінювання у далекому ІЧ-діапазоні [44].

4.2.4 Система поливу

Подачу поливної води організують із застосуванням VFD насосів і гідроаккумуляції для розв'язання пікових витрат і роботи насосів у високоефективній зоні. Керування за тиском або витратою дає змогу уникати дроселювання як не енергоефективного способу регулювання і працювати за кривими, близькими до оптимальних, що підтверджується керівництвами DOE/NREL та галузевими довідниками для насосних систем [40–42].

4.3 Підготовка кормів для свиней і ВРХ

4.3.1 Дробарки, млини, подрібнювачі

Для змінного навантаження доцільно застосовувати двигуни ІЕ3 як мінімально допустимий рівень згідно з Регламентом (ЄС) 2019/1781 та, за можливості, синхронно-релактансні ІЕ5 в комплекті з VSD (класифікація за ІЕС TS 60034-30-2) [39]. Це знижує питомі втрати електропривода і покращує регулювання моменту на низьких швидкостях. Перетворювачі частоти дозволяють узгодити частоту обертання з механікою процесу, зменшити пускові струми, а оптимізація сит/зазорів знижує «перемол» і холості втрати.

4.3.2 Змішувачі, гранулятори, транспортери, шнеки

Енергозбереження забезпечують правильним підбором передавальних чисел і ККД редукторів, профілактикою (регулювання натягу пасів, юстування, дотримання мастильних карт), а також запуском обладнання з рознесенням пусків у часі. Для вентиляторів сушіння та охолодження грануляту впроваджують VFD-керування [40, 53, 64].

4.3.4 Організаційні заходи

Планування енергоємних операцій поза піковими періодами (вночі, у «вікнах» низьких тарифів), вирівнювання графіків пуску приводів і балансування фазних навантажень зменшує пікову потужність і мережеві втрати, запобігає спрацюванню захистів та покращує якість напруги відповідно до вимог ДСТУ EN 50160:2023.

4.4 Водопостачання, каналізація та відкачування гноївки

Найбільший ефект дає керування за потребою: перетворювачі частоти на головних насосах, каскадування, точне підтримання тиску та робота у непіковий період, що дозволяє працювати ближче до ВЕР і мінімізувати кавітаційні та гідравлічні втрати [40–42]. Гідроаккумулятори згладжують імпульсні витрати, зменшуючи число включень. Для систем стоків і зберігання

відходів – робота за датчиками рівня з VFD-насосами для уникнення дроселювання і роботи вхолосту.

4.5 Холодильні установки та кондиціонування

Підбір холодильних машин і теплових насосів виконують з урахуванням сезонних показників (SEER/SCOP) за EN 14825. В експлуатації значні заощадження дають оптимізація циклів відтаювання, керування вентиляторами повітроохолоджувачів та повітряних конденсаторів, використання енергоефективних холодильних агентів, інверторних компресорів, а також усунення підсмоктування теплого повітря (інфільтрації) через ущільнення огорожень камер [49–52].

4.6 Компенсація реактивної потужності та корекція $\cos\phi$ для трифазних споживачів

За наявності помітної індуктивної складової (насоси, вентилятори, компресори) та трифазних ліній компенсація реактивної потужності з автоматичними щаблевими установками на низькій напрузі підвищує коефіцієнт потужності $\cos\phi$, зменшує струми і втрати у мережі, звільняє резерв трансформаторів та кабелів і покращує якість напруги. Сучасні настанови виробників (ABB, Siemens) підкреслюють коректний вибір конденсаторів, дроселів, обмеження пускових струмів та вимоги до заземлення і розрядників [56–58, 60, 65]. Компенсація має виконуватися з урахуванням вимог оператора системи розподілу та показників якості електроенергії за ДСТУ EN 50160:2023.

4.7 Система моніторингу і технічного обслуговування

Архітектура моніторингу включає вузол обліку (AMI/AMR), лічильники підрозділів навантаження, датчики процесів (клімат/тиск/витрата), локальний контролер HEMS із протоколами обміну та аналітикою (у т.ч. NILM-модулі) [55]. На рівні політик керування – регресійний аналіз питомого енергоспоживання для теплиці, кормоцеху, насосних станцій. Виявлення

дрейфу ККД вентиляно-інверторних агрегатів, компресорів і насосів; попереджувальне ТО за вібрацією або температурою підшипників [40–42, 53].

Висновки з розділу 4

Сукупне застосування заходів – LED-досвічування з димінгом залежно від часу та дати, використання термоштор, регульованих електроприводів (VFD) вентиляторів і насосів, теплових насосів з високим SCOP, компенсація реактивної потужності, контролерів керування HEMS/AMR – забезпечує суттєве скорочення споживання електроенергії та пікової потужності за одночасного підвищення технологічної керованості. Практичні керівництва для теплиць (NYSERDA, університетські програми з енергоекранів і LED) та промислових систем (DOE/NREL, виробники приводів і насосів) підтверджують високу віддачу від таких інвестицій за умови правильного проєктування і експлуатації.

5 ІНТЕГРАЦІЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

5.1 Фотоелектричні системи

У приватному господарстві з теплицею, насосними агрегатами, електроприводами кормоприготування та холодильним устаткуванням доцільно застосовувати гібридні ФЕС з можливістю роботи у режимах on-grid, off-grid та backup з пріоритизацією власного споживання [78]. Гібридна архітектура забезпечує живлення критичних навантажень (системи мікроклімату теплиці, циркуляційні насоси, автоматика, охорона, холодильні камери) під час порушень електропостачання, зменшує пікові навантаження та втрати на приєднанні до мережі низької напруги [79]. Вибір інверторів ґрунтується на відповідності вимогам ДСТУ EN 50549-1 щодо паралельного під'єднання генерувальних установок до розподільчих мереж НН (антиаварійні функції, захисти з напруги і частоти, режими реактивної потужності), а також на дотриманні вимог ДСТУ HD 60364-7-712 для проєктування та монтажу ФЕС і ДСТУ EN 62446-1 для приймально-пускових випробувань і документації.

Для мережевих та гібридних інверторів критичними є: сертифікація антиострівного захисту (включно з методиками IEC 62116), відповідність якості електроенергії у точці приєднання (параметри за ДСТУ EN 50160), можливість роботи з функціями Volt-Watt/Volt-Var, кероване обмеження потужності, багатоканальний MPPT і сумісність з системами накопичення.

Конфігурація масивів виконується на підставі локальних кліматичних даних (PVGIS або Global Solar Atlas) з оптимізацією кута нахилу та азимуту під сезонний графік навантаження (вегетаційні цикли теплиці, робота кормоцеху). Для України базові розрахунки річного виходу та помісячного енергопрофілю доцільно проводити за PVGIS (Брюссель, JRC), а попереднє районування за сумарним річним випромінюванням – за Global Solar Atlas [66; 67].

Аналіз впливу затінення є визначальним для стабільності генерації. При близьких затіненнях (димарі, фронти, несучі ферми теплиці, сусідні ряди

панелей) застосовують геометричні та електричні моделі із врахуванням конфігурації байпас-діодів і розрізу на субмодулі; практично орієнтація «ландшафт/портрет» і кількість струмопровідних гілок на MPPT істотно впливають на електричні втрати від затінення [68; 69; 80]. Використовуються спрощені та детальні моделі (PVsyst, Solar Pro тощо) з урахуванням «beam/circumsolar/diffuse/albedo» компонент. Рекомендації стосуються мінімізації співпадань тіней із лініями байпас-діодів і раціональної кількості стрінгів на вхід MPPT для обмеження невідповідності.

За неоднорідного освітлення і складної геометрії доцільне застосування мікроінверторів або оптимізаторів (MLPE) для підвищення продуктивності фотомасиву та зменшення втрат від затінення і деградації окремих модулів. Вибір MLPE виправданий у тепличних господарствах з сезонними навісами, термошторами та обмеженим кроком між рядами. [71; 80]

5.2 Системи накопичення електроенергії

В умовах побутового і агровиробничого споживання найбільш доцільні літій-іонні (LFP/NMC) системи з BMS і захисним комутаційним обладнанням, що відповідають вимогам безпеки стаціонарних промислових батарей ДСТУ EN 62619 (ідентичний EN/IEC 62619) та сумісним вимогам до систем безперебійного живлення ДСТУ EN IEC 62040-1 для побудови мікромереж і резервних шин критичних навантажень. Алгоритми експлуатації включають оптимізацію DoD, температурних діапазонів, SoC-вікон і календарного зберігання, а також погодинне керування циклами для зменшення пікових потужностей та балансування фаз у трифазних системах. [78]

Топологія ESS для нашого об'єкта передбачає виділення «критичної шини» (тепличний мікроклімат, насосні станції, автоматика кормоцеху, сервер/HEMS/AMR) із забезпеченням автоматичного переходу в острівний режим і зворотного синхронного ресинхронізованого приєднання; параметри якості напруги у точці спільного приєднання мають відповідати ДСТУ EN 50160 включно з часовою стабільністю частоти. [79]

5.3 Малі вітроенергоустановки

Для приватного господарства з невисокими щоглами і обмеженнями по шуму/візуальному впливу розглядаються малі ВЕУ за ДСТУ EN 61400-2 (конструктивна безпека, робочі режими) та методології вимірювання потужності і побудови енергетичної кривої за EN/IEC 61400-12-1:2022. Доцільність визначається за розподілом вітрів на висотах 10–30 м, характеристиками підстильного шару та наявністю турбулентних перешкод у тепличному комплексі; для верифікації ресурсу застосовують короткотермінові вимірювання з екстраполяцією до робочої висоти та порівнянням з референтними даними (Global Wind Atlas) з поправкою на місцевість. [78] Електричне приєднання до мережі низької напруги здійснюється за такими самими правилами, що і для ФЕС – ДСТУ EN 50549-1, з урахуванням антиострівного тестування та вимог до якості електроенергії. [71; 79]

5.4 Біоенергетика

Сировинна база господарства (гній ВРХ, свиней, рослинні залишки, відходи кормоприготування) забезпечує анаеробне зброджування з одержанням біогазу для мікро-ТЕЦ або для спалювання в котлах з виробленням тепла для ГВП і теплиць. Методики оцінки потенціалу та раціонального використання субстратів на рівні домогосподарств наведені у BEFS/FAO (household/community biogas), а для рішень із когенерацією варто враховувати сучасні огляди ЕВА/ІЕА щодо європейських тенденцій і ринкових параметрів [72–75]. Для теплиці доцільним є комбіноване використання: теплова енергія з біогазу для підтримання нічних температур і підігріву поливної води; електроенергія – для пікового підхоплення навантажень у безсонячні години або як резерв.

Процесна схема включає приймання сировини, гідророзведення, ферментер із мішалкою, газгольдер, систему очищення газу (H_2S /волога), когенераційну установку та утилізацію дигестату як добрива для тепличних культур або на полі. Економічні параметри визначаються питомими виходами

газу для змішаних субстратів (ко-зброджування), питомою теплотворною здатністю, коефіцієнтом використання встановленої потужності когенератора, а також сезонним профілем теплової потреби теплиць. На стадії експлуатації ключовими є стабільність pH/m , контроль сухих речовин, навантаження на об'єм (OLR) і своєчасна утилізація дигестату. [72; 73]

5.5 Теплові насоси та сонячні теплові колектори

Інтеграція повітря-вода або ґрунт-вода ТН у контур теплопостачання теплиці та будинку забезпечує високі COP/SCOP за низькотемпературних режимів (30–45 °С) з термошторами, енергозберігальними екранами та рециркуляцією повітря. Параметри сезонної енергоефективності оцінюють відповідно до EN 14825/EN 14511; сонячні трубчасті/плоскі колектори для ГВП і підігріву зворотної лінії доцільно добирати та сертифікувати за EN ISO 9806 із врахуванням стійкості до стагнації, тепловтрат і гідравлічних режимів. Комбінована схема PV-ТН-БАК-колектор з баком-акумулятором на 0,5–1,0 доби теплового навантаження теплиці мінімізує пуски ТН, а керування пріоритетами дозволяє використовувати надлишок PV-генерації для нагнітання тепла у бак і зниження споживання в піки мережі. [78–79]

5.6 Інтелектуальні системи керування потоками енергії

Розподілена система керування енергією (EMS/HEMS) у складі інверторів, ESS, ТН, мікрогенерації, насосів і освітлення теплиць повинна реалізовувати пріоритети живлення (критичні/важливі/некритичні), календарі робочих циклів під агротехнічний графік, обмеження потужності та алгоритми demand response (перенесення процесів на години низького тарифу/високої генерації). Вимоги до автоматизації будівель та їх енергоефективності формалізовані у EN ISO 52120-1, методології DSM/DR і архітектури HEMS описані у сучасних оглядах, які показують ефективність ціно- та подієвого керування, MPC-планування та багатокритеріальні постановки з урахуванням комфорту або урожайності. [76; 77]

Операційно система повинна:

- 1) прогнозувати PV-генерацію і споживання за історією споживання та прогнозом погодних умов;
- 2) виконувати оптимізацію заряд-розряд систем накопичення енергії з урахуванням деградації сонячних панелей;
- 3) квазіреальному часі балансувати фази і $\cos\phi$ на вводі (у межах вимог оператора мережі);
- 4) контролювати виникнення острівних станів роботи СЕС та якість електроенергії в цілому;
- 5) акумулювати дані лічильників з дистанційною передачею даних для постійного підвищення енергоефективності.

Для підтвердження відключення при втраті напруги використовують випробування інверторів за ІЕС 62116/ДСТУ EN 50549-1. Приєднання до мережі НН визначається параметрами якості напруги за ДСТУ EN 50160. [76; 77; 82]

Висновки з розділу 5

Об'єднання ФЕС, системи накопичення енергії і систем виробництва, споживання і обміну енергією (електроенергія, тепло, холод) на рівні об'єкта або мікромережі у господарстві формує архітектуру з високою часткою самоспоживання, зниженими піками навантаження та підвищеною надійністю живлення критичних споживачів. Виконання вимог EN 50549-1, EN 50160, HD 60364-7-712 і EN 62446-1 та керування на основі прогнозу генерування і споживання (ISO 52120-1, DR) забезпечують технічну узгодженість і економічну доцільність рішень для приватного господарства.

6 ПРОЄКТНІ РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

6.1 Заходи з енергозбереження

6.1.1 Перехід на опалення теплиці від теплового насосу

Проектні рішення приймалися на основі вихідних даних об'єкта (житловий будинок 150 м^2 , теплиця 96 м^2 , дільниця підготовки кормів, багатотарифний облік, трифазне приєднання $3 \times 230/400 \text{ В}$, 50 Гц , договірна потужність 16 кВт). Для теплиці як головного споживача у холодний сезон цільові параметри визначено з розрахункового теплового балансу та електричних навантажень на досвітлення, мікроклімат і полив.

Розрахункові тепловтрати теплиці прийнято у вигляді питомого потоку $q_{20} = 50 \text{ Вт} / \text{м}^2$ при $\Delta T = 20^\circ \text{ C}$ для плівково-каркасної конструкції з енергозберігальними екранами. Середньодобову потребу у теплоті для січня (Сумська область) при середньодобовій температурі $T_s \approx -6^\circ \text{ C}$ і мінімальній нічній температурі у теплиці $T_{\text{вн}} = 20^\circ \text{ C}$) можна оцінити

$$E_{\text{тепл.доб}} = \frac{q_{20} \cdot A \cdot (\Delta T / 20) \cdot CF \cdot 24}{1000}, \quad (6.1)$$

де $A = 96 \text{ м}^2$ – опалювана площа теплиці;

$\Delta T = T_{\text{вн}} - T_s = 20 - (-6) = 26^\circ \text{ C}$ – перепад температур;

$CF = 0,3$ – коефіцієнт використання потужності з урахуванням перервності опалення, радіаційного теплонадходження через прозорі конструкції, наявність екранів).

Підставляючи у (6.1), отримуємо величину необхідного добового електричного споживання від теплої електропідлоги

$$E_{\text{тепл.доб}} = \frac{50 \cdot 96 \cdot (26/20) \cdot 0,3 \cdot 24}{1000} = 44,93 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{добу}.$$

Зменшення енергоспоживання від опалення теплиці можна досягнути за рахунок заміни електропідлоги на ґрунтовий тепловий насос (ТН). Для режиму ТН у січні В0/W35 відповідно до EN 14511 коефіцієнт термотрансформації складає $COP \approx 3,4$. У зв'язку з тим, що температура ґрунту протягом року підтримується відносно однаковою на рівні $T_x \approx 10^\circ \text{C}$ та з урахуванням того, що у теплиці підтримується постійна температура, коефіцієнт термотрансформації ТН протягом року підтримується відносно сталим.

Середньодобова пікова потужність системи опалення теплиці каркасна плівкова теплиця з енергозберігаючими екранами складає

$$P = \frac{q_{20} \cdot A \cdot (\Delta T / 20)}{1000} = \frac{50 \cdot 96 \cdot (26 / 20)}{1000} = 6,24 \text{ кВт}.$$

З урахуванням потреби мати 25–40 % резерву під нестационарні теплові процеси та можливе охолодження у міжсезоння необхідна теплопродуктивність ТН повинна складати

$$Q_{\text{ТН}} \approx 1,4P = 1,4 \cdot 6,24 = 8,75 \text{ кВт}.$$

За отриманим значенням $Q_{\text{ТН}}$ підбираємо модель ТН «ґрунт–вода» Viessmann Vitocal 200-G BWC 201.B10 [34]. Номінальна теплова потужність ТН складає 10,3 кВт, COP до 3,4–4,8 при В0/W35 (EN 14511); максимальна температура подачі води 65°C ; живлення $3 \times 400 \text{ В}$; холодоагент R410A; рівень звуку 44 дБ(А); система керування Vitotronic 200, функція пасивного охолодження; габарити блоку $680 \times 1081 \times 600 \text{ мм}$; мінімальна витрата контуру опалення $1,16 \text{ м}^3/\text{год}$. Середня вартість в Україні 800000 грн. Даний ТН має сучасний спіральний компресор, що зумовлює низькі пускові струми.

Вбудований ТЕН у компресор потужністю 9 кВт забезпечує стабільну роботу компресора за низьких температур. Зв'язка системи керування ТН з НEMS/EMS дозволяє реалізувати пріоритизацію роботи ТН у нічні години та у «сонячні вікна» (за наявності живлення від СЕС), використання буферної ємності – бака-акумулятора гарячої води питомою ємністю $50\text{--}100 \text{ л/кВт}$ дозволяє перерозподілити пікові навантаження на електромережу протягом доби.

Електроспоживання на опалення теплиці тепловим насосом розраховуємо для найгірших умов експлуатації

$$E_{\text{ел.ТН}} = \frac{E_{\text{тепл}}}{\text{COP}}; \quad (6.2)$$

$$E_{\text{ел.ТН}} = \frac{44,93}{3,4} = 13,21 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{добу},$$

що узгоджується з паспортними показниками сучасних ґрунтових ТН і методиками сезонної оцінки EN 14825 [42; 55; 312].

За типового питомого тепловідбору з вертикальних зондових свердловин $40\text{--}50 \text{ Вт/м}$ потрібна довжина ґрунтового контуру випарника складає $200\text{--}240 \text{ м}$ (наприклад, $2 \times 120 \text{ м}$), що відповідає практиці для Північного Лісостепу.

У табл. 6.1 подано порівняльне електроспоживання для потреб опалення електропідлогою та ТН.

Як бачимо з даних табл. 6.1 річна економія електроспоживання приватного домогосподарства у зв'язку з переходом від електроопалення теплиці від теплої підлоги на використання ТН складає $4174,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, що складає близько $23,8 \%$ від початкового енергоспоживання господарства.

Таблиця 6.1 – Електроспоживання для потреб опалення теплиці електропідлогою та ТН, $\text{kВт} \cdot \text{год}$

Мі-сяць	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
$E_{\text{т.підл.}}$	1125	1012,5	787,5	450	112,5	0	0	0	0	337,5	787,5	1068,7	5681,2
$E_{\text{ТН}}$	330,9	281,2	196,9	104,7	0	0	0	0	0	80,4	207,2	305,4	1506,7
ΔE	794,1	731,3	590,6	345,3	112,5	0,0	0,0	0,0	0,0	257,1	580,3	763,3	4174,5

На рис. 6.1 зображено порівняння річних графіків навантаження об'єкту з різними джерелами теплопостачання систем опалення теплиці.

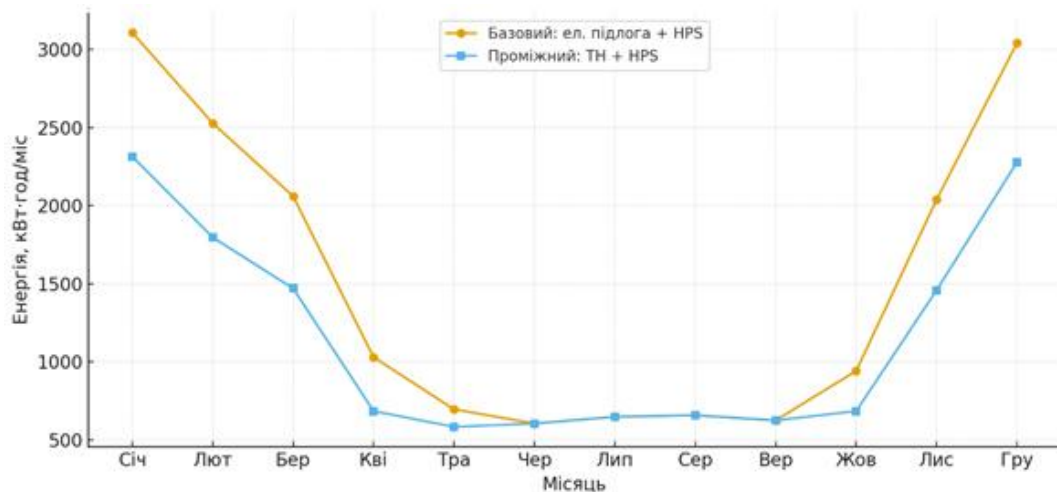


Рисунок 6.1 – Річний графік навантаження об'єкту з електроопаленням теплиці та використанням ТН

Для зменшення навантаження на систему опалення теплиці також доцільно застосувати термоштори або енергоекрани, які внаслідок закриття у нічний час дозволять зменшити теплонадходження на 15–30 %.

6.1.2 Заміна ДНаТ ламп на фіто-LED у теплиці

Для досвітлення рослин у теплиці із розрахунку $80 \text{ Вт} / \text{ м}^2$ застосовується HPS-система з лампами ДНаТ Philips/Signify GreenPower HPS 600W EL (див. табл. А.1) з встановленою потужністю системи освітлення $10,8 \text{ кВт}$ та тривалістю роботи 4 год/добу у зимові місяці.

Для зимово-осіннього досвітлення у теплицях поширені такі рівні інтенсивності додаткового освітлення:

– високотросові плодоовочеві (помідор, огірок тощо): густина потоку фотонів на площі, що падає на рослини $PPFD_{\text{мета}} = 150\text{--}200 \text{ мкмоль}/(\text{ м}^2 \cdot \text{ с})$ як типова інтенсивність додаткового освітлення, виходячи з цільового значення кількості фотосинтетично активних фотонів (у діапазоні $400\text{--}700 \text{ нм}$), що надходять на 1 м^2 поверхні за добу $DLI \geq 25\text{--}30 \text{ моль}/(\text{ м}^2 \cdot \text{ добу})$.

– листові зелені (салати, рукола тощо): $PPFD_{\text{мета}} = 100\text{--}200 \text{ мкмоль}/(\text{ м}^2 \cdot \text{ с})$; для вищої якості і швидкості росту – до $PPFD_{\text{мета}} = 200 \text{ мкмоль}/(\text{ м}^2 \cdot \text{ с})$, з урахуванням сумарного DLI та технології вирощування.

У практиці тепличного рослинництва DLI використовують як необхідні кількості фотонів для вирощування культури: задають цільовий DLI і, знаючи тривалість досвітлення, обчислюють потрібний $PPFD$, або навпаки – для планування системи освітлення. Цей метод називають за балансом фотонів відповідно до цільового $PPFD$.

Алгоритм розрахунку такий:

1) знаходять сумарний потік на задану площу теплиці A

$$PPF_{\Sigma} = PPFD_{\text{мета}} \cdot A; \quad (6.3)$$

2) розраховують необхідну кількість світильників N для забезпечення світлового потоку одного приладу

$$N = \frac{PPF_{\Sigma}}{PPF_{\text{світільника}} \cdot UF \cdot MF}, \quad (6.4)$$

де UF – коефіцієнт використання світильника; $UF = 0,8 - 0,95$ залежно від висоти підвісу, оптики й відбивних властивостей конструкцій;

MF – коефіцієнт запасу/старіння; для HPS/ДНаТ ламп задають $MF = 0,9$; для якісних LED $MF = 0,9 - 0,95$.

Виконуємо перевірний розрахунок освітлення теплиці для таких вихідних даних: лампи ДНаТ; $UF = 0,85$; $MF = 0,9$; $PPFD_{\text{мета}} = 150 \text{ мкмоль} / (\text{м}^2 \text{с})$; $A = 96 \text{ м}^2$; для лампи Philips/Signify GreenPower HPS 600W EL $PPF_{\text{світільника}} = 1120 \text{ мкмоль} / \text{с}$; $N = 18 \text{ шт}$.

Сумарний потік на задану площу теплиці відповідно до (6.3)

$$PPF_{\Sigma} = 150 \cdot 96 = 14400 \text{ мкмоль} / \text{с}.$$

Необхідний потік фотонів із розрахунку на один світильник знаходимо з виразу (6.4)

$$[PPF_{\text{світільника}}] = \frac{PPF_{\Sigma}}{N \cdot UF \cdot MF} = \frac{14400}{18 \cdot 0,85 \cdot 0,9} = 1046 \text{ мкмоль} / \text{с}.$$

Отримане значення порівнюємо зі значенням для лампи Philips/Signify GreenPower HPS 600W EL $PPF_{\text{світільника}} = 1120 \text{ мкмоль} / \text{с}$

$$[PPF_{\text{світільника}}] = 1046 \text{ мкмоль} / \text{с} < PPF_{\text{світільника}} = 1120 \text{ мкмоль} / \text{с}.$$

Умова виконується, тому система освітлення з лампами ДНаТ підібрана вірно.

Загальна приєднана потужність такої системи складає

$$P_{\Sigma HPS} = P_{\text{світильника}} \cdot N = 600 \cdot 18 = 10800 \text{ Вт} = 10,8 \text{ кВт}.$$

Як енергозберігаючий захід з модернізації системи освітлення теплиці розглянемо перехід на LED-світильники з питомою ефективністю 3 мкмоль/Дж, що дозволить скоротити електроспоживання системи досвітлення на 30–40 % при незмінній фотосинтетичній освітленості [39; 40]. Виконаємо проектний розрахунок такої системи.

Як світильник задаємося моделлю Philips/Signify GreenPower LED Toplighting Compact (dimnable), що має технічні характеристики, наведені у табл. А.1.

Для забезпечення необхідного сумарного потоку фотонів у теплиці на рівні $PPF_{\Sigma} = 14400 \text{ мкмоль/с}$ та з урахуванням того, що обраний LED-світильник має потік фотонів $PPF_{\text{світильника}} = 1750 \text{ мкмоль/с}$, визначимо необхідну кількість світильників за виразом (6.4)

$$N_{LED} = \frac{PPF_{\Sigma}}{[PPF_{\text{світильника}}] \cdot UF \cdot MF} = \frac{14400}{1750 \cdot 0,9 \cdot 0,95} = 9,6 \approx 10 \text{ шт.},$$

де для LED-світильників $UF = 0,9$ і $MF = 0,95$.

Загальна приєднана потужність системи підсвітки з LED-світильником складе

$$P_{\Sigma LED} = P_{\text{світильникаLED}} \cdot N_{LED} = 520 \cdot 10 = 5200 \text{ Вт} = 5,2 \text{ кВт}.$$

де $P_{\text{світильникаLED}} = 520 \text{ Вт}$ – потужність LED-світильника.

У табл. 6.2 подано порівняльне електроспоживання для потреб досвітлення теплиці лампами ДНаТ (HPS) і спеціалізованими фіто-LED-лампами.

Таблиця 6.2 – Електроспоживання для потреб досвітлення теплиці лампами ДНаТ (HPS) і спеціалізованими фіто LED-лампами, $kWh \cdot год$

Місяць	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
E_{HPS}	1339,2	907,2	669,6	162	0	0	0	0	97,2	334,8	648	1339,2	5497,2
E_{LED}	644,8	436,8	322,4	78	0	0	0	0	46,8	161,2	312	644,8	2646,8
ΔE	694,4	470,4	347,2	84	0	0	0	0	50,4	173,6	336	694,4	2850,4

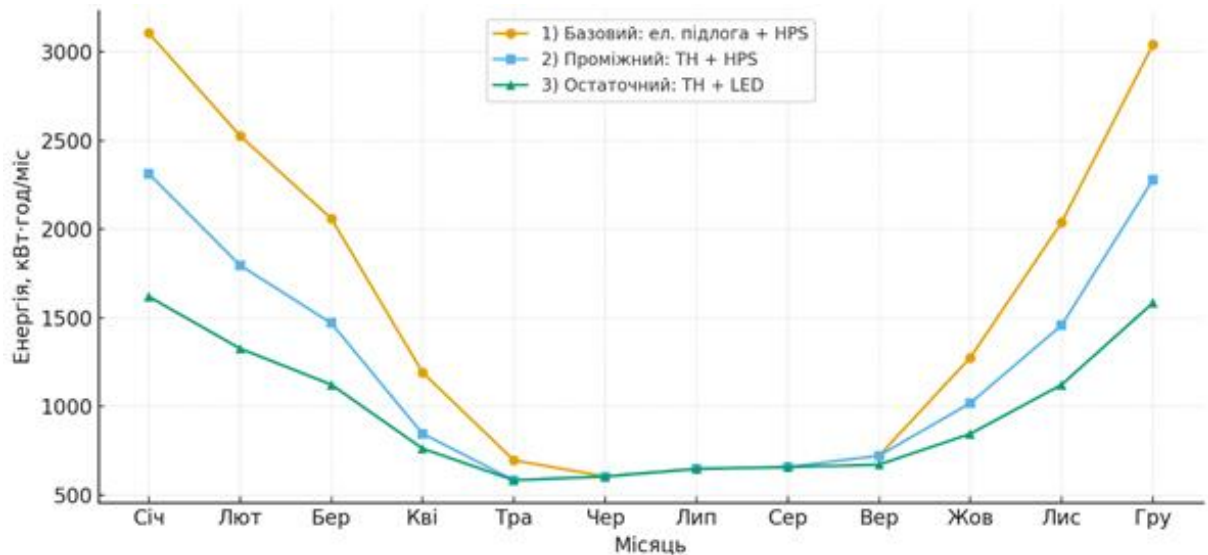


Рисунок 6.2 – Річний графік електроспоживання об'єкту залежно від ступеня енергозбереження

Як бачимо з даних табл. 6.2, річна економія електроспоживання приватного домогосподарства у зв'язку з переходом від досвітлення теплиці

ДНаТ лампами на використання фіто LED-ламп складає $2850,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, що складає близько 16,2 % від початкового енергоспоживання господарства.

На рис. 6.2 видно поступове зменшення електроспоживання об'єктом за рахунок запроваджених заходів.

З метою енергозбереження також доцільно розглянути керування системи досвітлення рослин за DLI для LED-досвітки за рахунок скорочення годин у ясні дні, що дозволить стабілізувати якість розсади та підвищити врожайність.

6.1.3 Енергозбереження у кормоцеху та інших системах

Силове обладнання підібране з урахуванням обмеження 16 кВт на вводі та профілю добового навантаження. Для дільниці кормів прийняті одиничні потужності електрообладнання $10,5 \text{ кВт}$ (дробарка), 4 кВт (змішувач), 18 кВт (пелет-прес) із середньою одночасною потужністю у зміні близько 14 кВт . Пуски агрегатів рознесені у часі, щоб уникати сумарних піків. Силове обладнання хоча і є потужним, однак воно працює досить короткий проміжок часу, тому його внесок у загальне енергоспоживання не є найбільшим. Отже, енергозбереження у електроприводах силового обладнання є доцільним, однак воно не буде на стільки вагомим як зміна джерела тепла у системі опалення та системи освітлення теплиці.

Для зменшення споживання електроенергії у системі підтримання мікроклімату доцільно використовувати регульований електропривід на вентиляторах і насосах поливу, що дозволить зменшити енергоспоживання на 20–40 %.

Також доцільно розглянути рекуперацію тепла у теплиці та оптимізувати полив за рахунок використання гідроакумуляторів з підтриманням тиску у системі за графіком зі зміщенням у години найменшого електричного навантаження у мережі.

Компенсація реактивної потужності для трифазних приводів дозволить зменшити кількість енергії, що буде фіксуватися лічильником електричної енергії, що умовно можна вважати заощаджувачим заходом.

6.2 Дослідження впливу регулювання електроприводу на енергозбереження

Електроприводи систем мікроклімату та поливу в тепличних господарствах можуть формувати значну частку електроспоживання, оскільки працюють у тривалих, динамічно змінних режимах за умов добових і сезонних коливань тепловологісного навантаження та водоресурсних потреб. Типовими виконавчими механізмами для циркуляції повітря є осьові або радіальні вентилятори, приводи вентиляційних стулок, а також відцентрові насоси поливу. Для всіх цих агрегатів справедливі закони подібності машин із рухомих робочим тілом, згідно з якими подача пропорційна швидкості обертання, напір – її квадрату, а споживана потужність – частоті обертання у кубі. Отже, перехід від простого релейного керування «увімкнено/вимкнено» та дроселювання до частотного керування (VFD) принципово змінює енергетичну картину: за умови зменшення швидкості до 80 % від номінальної споживана потужність падає орієнтовно до половини, а за 50 % – до однієї восьмої від номіналу. Поряд із прямою економією споживаної електричної енергії застосування VFD зменшує пускові струми, підвищує керованість параметрів мікроклімату та тиску в мережі зрошення, знижує механічні навантаження на насосно-вентиляторне обладнання, а також шум і вібрацію. Водночас використання перетворювачів частоти зумовлює появу вищих гармонік струму і потребує правильного вибору схем електроживлення, фільтрації та координації захистів, а також моніторингу якості електроенергії. У цьому контексті формулюється завдання кількісної оцінки ефекту VFD на реальних профілях попиту тепличного господарства з урахуванням погодинної мінливості, агротехнічних регламентів та критеріїв надійності, що дозволяє обґрунтувати доцільність інвестицій і визначити оптимальні стратегії керування для мінімізації енерговитрат без погіршення технологічної якості процесів.

Математична модель. Розглядається привід вентилятора або насоса, який працює в квазістаціонарному режимі з безперервним регулюванням

швидкості $\bar{n} \in [0;1]$ (VFD) або з керуванням «увімкнено/вимкнено» (ON/OFF) при номінальній швидкості $\bar{n} = 1$.

Для вентиляторів та насосів використовуються афінні закони подібності:

$$\begin{cases} Q \sim n; \\ H \sim n^2; \\ P = n^3. \end{cases} \quad (6.5)$$

Електрична потужність у спрощеній моделі:

$$P_{ел}(\tau) = P_{ном} \cdot n(\tau)^3 / \eta_{дв}, \quad (6.6)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність при $\bar{n} = 1$, тобто при $n = n_{ном}$;

$\eta_{дв}$ – ККД електродвигуна (для моделювання задаємося $\eta_{дв} \approx 1$).

У режимі ON/OFF допускається робота з коефіцієнтом заповнення

$\delta(\tau) = \frac{T_{ON}(\tau; \Delta\tau)}{\Delta\tau}$ (де $T_{ON}(\tau; \Delta\tau)$ – сумарна тривалість увімкненого стану за

вікно $\Delta\tau$; $\delta(\tau) \in [0;1]$), що дорівнює відносному попиту за витратою

$d(\tau) = \frac{Q_{ном}(\tau)}{Q_{ном}}$ за інтервал усереднення ($\Delta\tau = 5 \text{ хв}$); $d(\tau) \in [0;1]$. Тоді середня

електрична потужність на цьому кроці

$$\bar{P}_{ON/OFF}(\tau) = \delta(\tau) \cdot P_{ном}; \quad (6.7)$$

$$\delta(\tau) = d(\tau). \quad (6.8)$$

У режимі VFD задаємося $n(\tau) = d(\tau) \Rightarrow P_{VFD}(\tau) = P_{ном} d(\tau)$. Енергія на кроці дискретизації $\Delta\tau$ дорівнює $E(\tau) = P(\tau)\Delta\tau$.

Моделювання

Профіль попиту, що визначає електроспоживання, для аграрного виробництва суттєво залежить від періоду року, вирощуваної культури, способу її вирощування, особливостей сорту або гібриду, стадії вегетації тощо. Для прикладу у даному дослідженні розглянуто вирощування огірків у закритому ґрунті, період плодоношення; місяць грудень. Такий період і культура є найбільш характерним для даного приватного господарства.

Задаємося 24-годинними профілями попиту відповідно до технологічних рекомендацій для обраного періоду року, культури і стадії вегетації:

– вентиляція для забезпечення температурно-вологісного режиму: плавний добовий цикл від 25 до 100 % з піком для просушування у обід (11:00–13:00) та післяобіднім обдувом рослин з відносною витратою 50 % (рис. 6.3); мінімальне значення коефіцієнту попиту (25 %) обране із урахуванням забезпечення мінімальних швидкостей потоків повітря, що забезпечують рівномірний розподіл полів температури, вологості і концентрацій CO_2 у об'ємі теплиці;

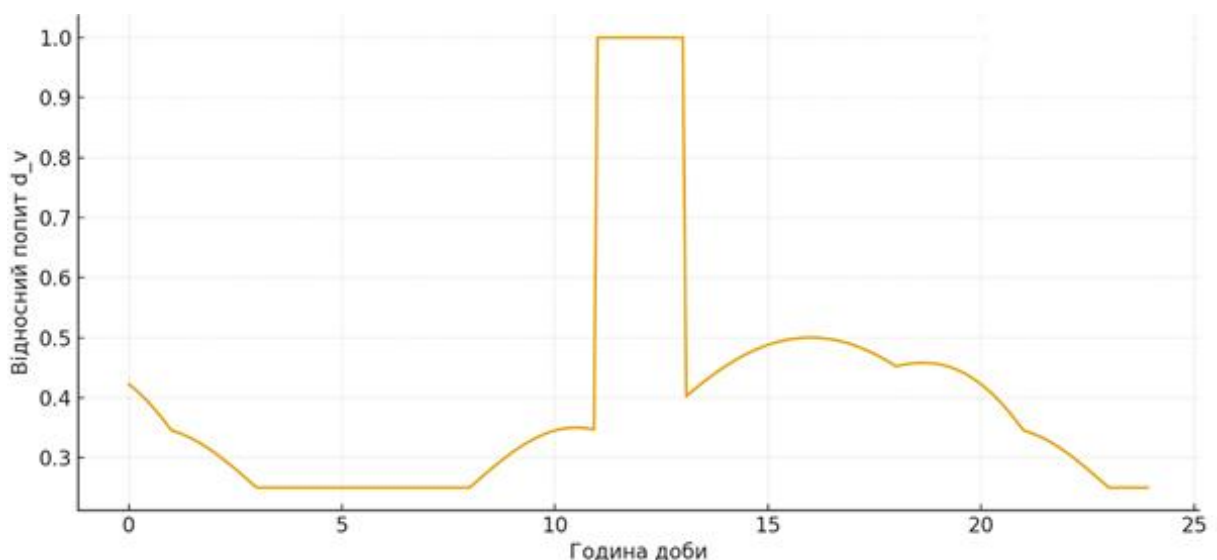


Рисунок 6.3 – Добовий профіль попиту системи вентиляції теплиці

– полив три рази на добу: 09:30–10:30 (100 %); 12:00–12:15 (50 %); 15:30–16:15 (80 %) (рис. 6.4). Полив реалізовано у денні години коли наявне сонячне опромінення теплиці, яке дозволяє отримати найкращий спектр освітлення, що сприяє засвоєнню рослинами корисних речовин. При цьому забезпечується (у комбінації з роботою системи вентиляції) рівномірний розподіл вологи у об'ємі теплиці та суттєве зменшення розвитку хвороб рослин, спричинених підвищеною вологістю.

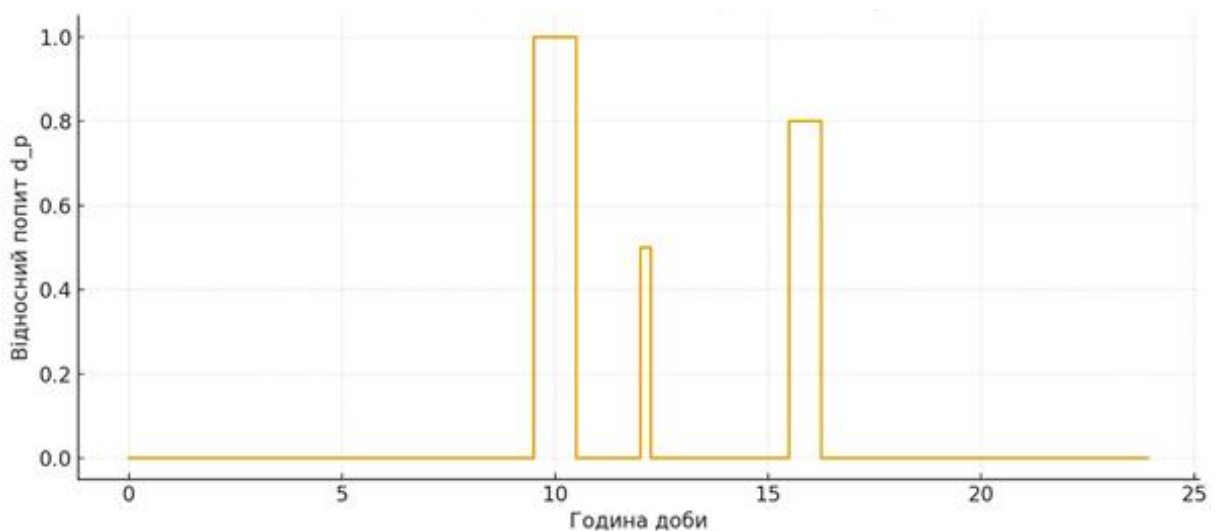


Рисунок 6.4 – Добовий профіль попиту системи поливу теплиці

Числові результати моделювання наведені у табл. Б.1 і Б.2. За цими значеннями побудуємо добові графіки навантажень: на рис. 6.5 наведено добові графіки навантажень електроприводу насосу для ON/OFF і VFD способів регулювання, а на рис. 6.6 наведено добові графіки навантажень електроприводу вентилятору для ON/OFF і VFD способів регулювання; на рис. 6.5 наведено сумарні добові графіки навантажень для ON/OFF і VFD способів регулювання. Крок інтегрування – 5 хв.

У зв'язку з великою кількістю типових розрахунків виконуємо їх у спеціалізованій програмі Microsoft Excel із подальшим перенесенням результатів у відповідні таблиці та побудовою графіків електроспоживання.

Для прикладу у роботі виконаємо розрахунок для одного режиму: насос, третє вікно зрошення 15:30–16:15 ($\Delta\tau = 45\text{хв}$). Для цього випадку вікно попиту складає $d = 0,8$ (80 % від номінальної витрати) впродовж 45 хв = 0,75 год. Номінальна потужність насоса $P_{ном} = 1,1\text{кВт}$.

1) Режим ON/OFF (регулювання дроселюванням): насос працює на повній швидкості $\bar{n} = 1$, отже, його потужність складає $P_{ON/OFF} = P_{ном} = 1,1\text{кВт}$.

Кількість спожитої насосом електроенергії протягом періоду, що розглядається, складе

$$E_{ON/OFF} = P_{ON/OFF} \cdot \Delta\tau = 1,1 \cdot 0,75 = 0,825\text{кВт} \cdot \text{год}.$$

2) Для режиму VFD (регулювання швидкості) задаємося $n = d = 0,8$. Відповідно до кубічного закону потужність приводу складе

$$P_{VFD} = P_{ном} \cdot \bar{n}^3 = 1,1 \cdot 0,8^3 = 0,704\text{кВт}.$$

Кількість спожитої насосом електроенергії протягом періоду, що розглядається, складе

$$E_{VFD} = P_{VFD} \cdot \Delta\tau = 0,704 \cdot 0,75 = 0,528\text{кВт} \cdot \text{год}.$$

Зменшення енергоспоживання за розрахунковий період:

$$\Delta E = E_{ON/OFF} - E_{VFD} = 0,825 - 0,528 = 0,297\text{кВт} \cdot \text{год}.$$

або у відносних одиницях

$$\delta(\Delta E) = \frac{\Delta E}{E_{ON/OFF}} \cdot 100\% = \frac{0,297}{0,825} \cdot 100\% = 36,0\%.$$

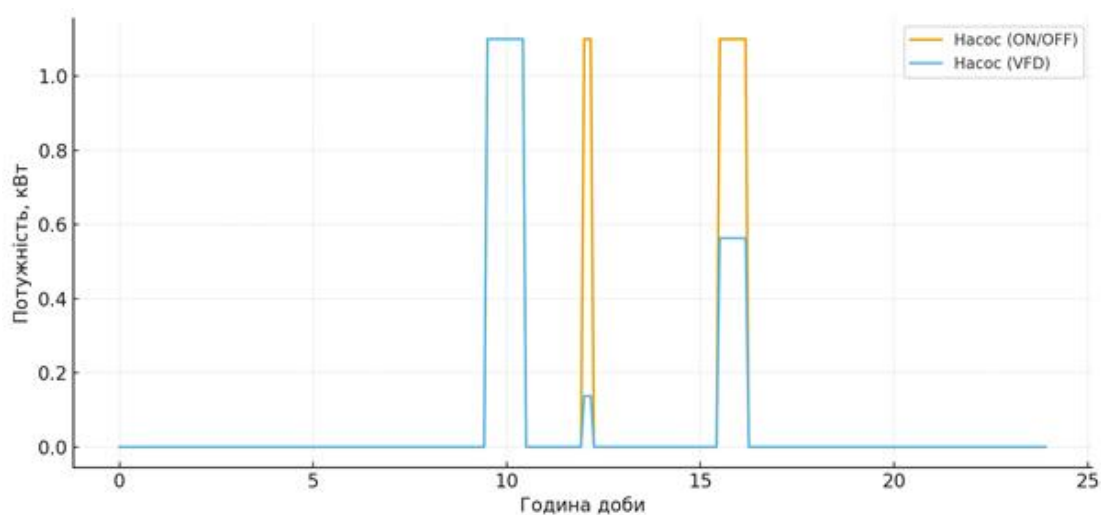


Рисунок 6.5 – Добові графіки навантажень електроприводу насосу для ON/OFF і VFD способів регулювання (за усередненими параметрами)

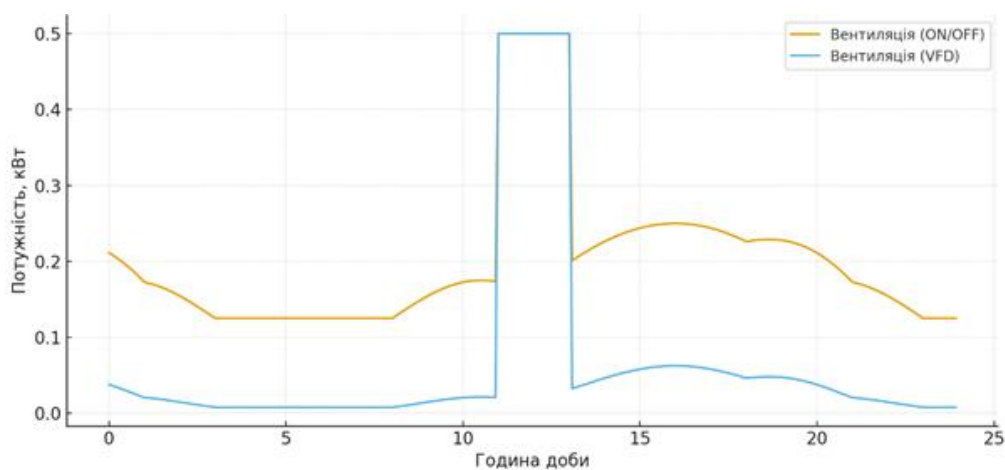


Рисунок 6.6 – Добові графіки навантажень електроприводу вентилятора для ON/OFF і VFD способів регулювання (за усередненими параметрами)

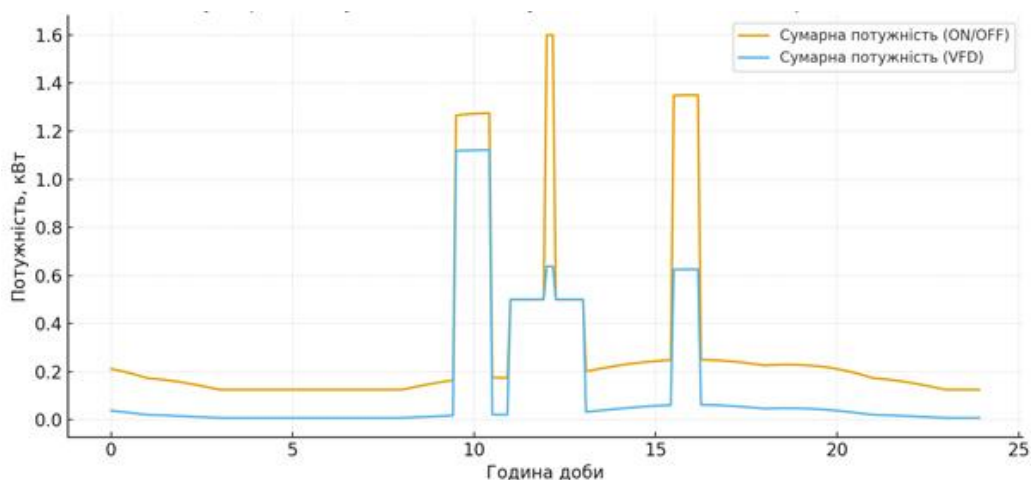


Рисунок 6.7 – Сумарні добові графіки навантажень (вентилятор + насос) для ON/OFF і VFD способів регулювання (за усередненими параметрами)

Відомо, що при регулюванні методом ON/OFF двигун працює періодично на номінальній потужності, а періодично відключений. У результаті отримують ступеневий графік навантаження (за відносним попитом або потужністю) з періодичними стрибками від нуля до номінального значення параметру. Однак на практиці дійсний графік енергоспоживання, побудований за описаним вище принципом, не є наглядним для оцінки ефективності робочого процесу, тому у даній роботі на рис. 6.3, 6.6 і 6.7 добовий графік навантаження при регулюванні у режимі ON/OFF побудований за усередненими у часі параметрами, що вплинуло на отримання плавних ліній.

Зведені результати моделювання

Відповідно до розрахунків (див. табл. Б.1, Б.2, рис. 6.3–6.7):

– загальне добове електроспоживання систем поливу і вентиляції теплиці складає $7,09 \text{ кВт}\cdot\text{год}$;

– добове електроспоживання у режимі VFD складає $3,17 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Добова економія електроспоживання при переході від режиму ON/OFF до VFD складає $7,09 - 3,17 = 3,92 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, що відповідає зменшенню на 55,3 %.

Аналіз результатів

Електроприводи системи вентиляції у режимі ON/OFF споживають у середньому $4,89 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$, а у режимі VFD – $1,61 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$, отже, перехід на регульований привід дозволить отримати зменшення споживання електроенергії на 67 % за рахунок зменшення потужності відповідно до виразу (6.5) і підтримання її на пропорційно фактичній витраті при середніх навантаженнях до 100 %.

Електроприводи системи водопостачання (насоси) у режимі ON/OFF споживають у середньому $2,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$, а у режимі VFD – $1,56 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$ отже, перехід на регульований привід дозволить отримати

зменшення споживання електроенергії на 29 % завдяки роботі на змінній витраті без використання байпасування або дроселювання.

Екстраполюючи отримані результати на типовий 30-денний зимовий місяць із таким самим графіком дає орієнтовну економію близько $121,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{міс}$. З урахуванням сезонності фактичний річний ефект буде меншим влітку та більшим у міжсезоння.

Необхідно враховувати, що профіль споживання є змінним не лише протягом доби, але й протягом року, тому загальну річну економію від переходу на регульований електропривід систем поливу і вентиляції можна розрахувати лише наближено, задаючись середньозваженими місячними показниками попиту по кожній системі (див. табл. 6.2). При виборі цих показників враховувалося:

1) у холодний період (грудень–лютий) нічний мінімум витрати системи вентиляції складає $0,25\text{--}0,30$, просушувальні імпульси забезпечують максимальну роботу системи ($d_{\text{вент}} = 1,0$) у обідній час, через що середнє за добу склало близько $\bar{d}_{\text{вент}} = 0,38$. Полив узимку забезпечується трьома короткими проміжками ($1,0 \text{ год}$ при $d_{\text{пол}} = 1,0$; $0,25 \text{ год}$ при $d_{\text{пол}} = 0,5$; $0,75 \text{ год}$ при $d_{\text{пол}} = 0,8$), що еквівалентно середньодобовому значенню $\bar{d}_{\text{пол}} = 0,072$;

2) у період міжсезоння (березень–квітень, жовтень–листопад) необхідно забезпечувати більший повітрообмін $\bar{d}_{\text{вент}} = 0,41\text{--}0,46$ і трохи довші поливні вікна (в еквіваленті $\bar{d}_{\text{пол}} = 0,10\text{--}0,12$);

3) у теплий період (травень–вересень) забезпечуються довгі тривалості вентиляції при високих $d_{\text{вент}}$ (часто до $1,0$ у денні години) та більшу кількість поливів, тому $\bar{d}_{\text{вент}} = 0,55\text{--}0,62$ і $\bar{d}_{\text{пол}} = 0,16\text{--}0,17$.

З урахуванням поданих вище рекомендації було проаналізовано річну економію електроенергії при використанні VFD у системі поливу і вентиляції теплиці (з урахуванням значень відповідних коефіцієнтів попиту $\bar{d}_{\text{вент}}$ і $d_{\text{пол}}$, див. табл. 6.3). Результати наведені у табл. 6.4 і на рис. 6.8.

Таблиця 6.3 – Середньомісячні коефіцієнти попиту у системах вентиляції і поливу теплиці

Місяць	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{d}_{\text{вент}}$	0,38	0,37	0,44	0,46	0,55	0,6	0,62	0,61	0,5	0,45	0,41	0,38
$d_{\text{пол}}$	0,072	0,072	0,1	0,12	0,16	0,16	0,17	0,17	0,14	0,11	0,1	0,072

Таблиця 6.4 – Помісячне електроспоживання об'єкту E_{VFD} , кВт·год, при впровадженні VFD у системах вентиляції і поливу теплиці та середньомісячна економія за рахунок впровадження заходу ΔE_{VFD}

Мі-сяць	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
E_{VFD}	1498,5	1216,7	986,6	611	454	479,6	518,4	528,4	546,4	689,1	971,5	1463	9943,4
ΔE_{VFD}	121,5	109,7	155,8	150,7	128,6	124,4	128,6	128,6	124,4	155,8	150,7	121,5	1600,3

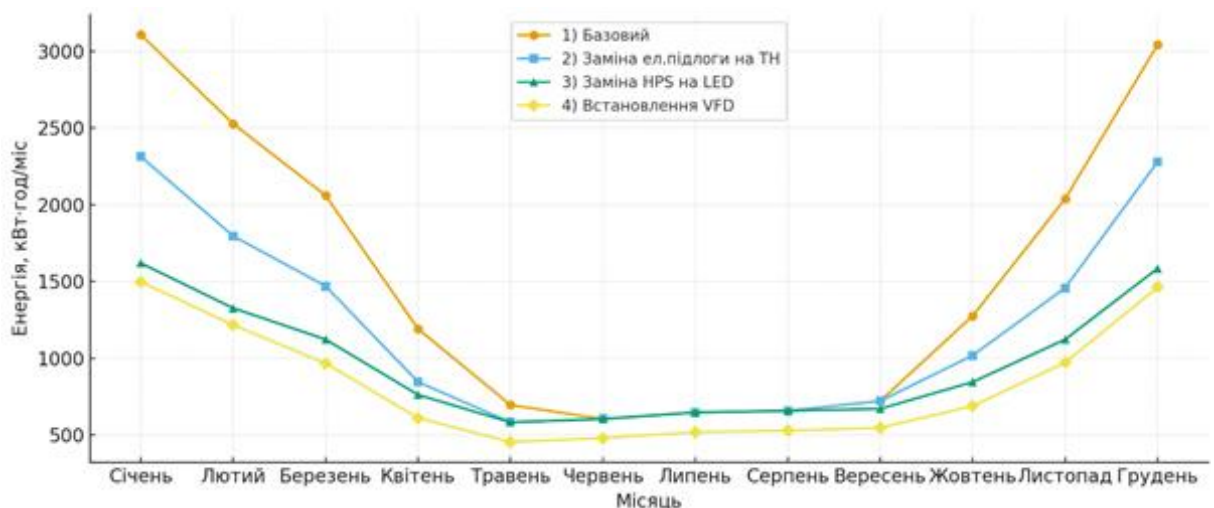


Рисунок 6.8 – Порівняння річних графіків електроспоживання приватним домогосподарством залежно від енергозберігаючого заходу

Супутній вплив на систему електропостачання

За підрахунком переходів із заданою роздільною здатністю 5 хв отримано:

- кількість еквівалентних пусків системи вентиляції у режимі ON/OFF складає десятки за добу (часті цикли);
- кількість пусків системи водопостачання (насосів) у режимі ON/OFF 2–3 рази на добу, що відповідає вікнам поливу.

Пускові струми у режимі ON/OFF оцінюються як $I_{\text{пуск}} \approx 6I_{\text{ном}}$, а пусковий момент як правило 1,5–2,5 від номінального при прямому пуску електродвигуна (DOL), коли статор відразу під'єднують до повної лінійної напруги 3×400 В. Через великий стрибок струму можливі короточасні провали напруги на шині 0,4 кВ, підвищені електромагнітні та механічні навантаження (ударні моменти на валу, муфтах, підшипниках) та нагрівання обмоток. Тому DOL застосовують здебільшого для двигунів відносно малої потужності і там, де мережа має достатню жорсткість, а технологічний процес допускає різкий розгін. На відміну від прямого пуску електродвигуна, переключення схем підключення електродвигуна «зірка–трикутник», плавний пуск або перетворювач частоти (VFD) зменшують пусковий струм і роблять розгін керованим. Плавний пуск знижує напругу на статорі під час пуску й обмежує $I_{\text{пуск}}$, але не дає регулювання швидкості в усталеному режимі. VFD ще ефективніше обмежує пусковий струм (приблизно до $I_{\text{пуск}} \approx 1,5I_{\text{ном}}$), забезпечує плавний розгін або гальмування та подальше енергоощадне керування частотою (швидкістю) n , завдяки чому зменшується споживана потужність вентиляторно-насосних механізмів за законом $P \sim n^3$. Для підтримання якості електроенергії використовується показник спотворень струму $THD(i)$, який для 6-пульсних VFD без фільтра беруть на рівні 30–40 %, а зі стандартним дроселем – 25–30 %. Натомість коефіцієнт зсуву у режимі VFD наближається до 1, але загальний коефіцієнт зсуву PF зменшується через гармоніки (як правило $PF = 0,95 - 0,97$).

Обговорення результатів

Сумарний профіль потужності для режиму VFD не має постійного споживання потужності під час зрошення та має відчутно менше електроспоживання у періоди часткових потреб вентиляції або водопостачання. За рахунок $P \sim n^3$ зменшення швидкості обертання електродвигуна, яка визначає зменшення подачі, наприклад до 80 %, падіння потужності становитиме $0,8^3 \approx 0,512$ від номінальної.

Для насоса видно, що при зменшенні витрати води до 70 % від номінальної при використанні VFD необхідне електроспоживання складе лише $0,7^3 \approx 0,343$ від номінальної потужності. У схемі ON/OFF стандартно система працюватиме на повну потужність із наступною її безповоротною втратою під час дроселювання.

Вентиляція вночі та вранці працює на 5–20 % від номінальної витрати: у режимі VFD це дозволяє зменшити електроспоживання до 1–8 % від номінальної потужності, тоді як у режимі ON/OFF дає пропорційний середній прямокутний пік навантаження, що енергетично вигідніше лише при дуже малих вимогах і великих часових проміжках повного вимкнення. Для системи мікроклімату теплиці така схема як правило є не оптимальною.

Практичні рекомендації

Встановлення VFD у системі підтримання мікроклімату для регулювання подачі вентиляторів із налаштуванням за температурою (рідше вологістю) дозволяє забезпечити плавний пуск і економію електроспоживання, однак вимагає встановлення обмеження мінімальної частоти (як правило 20–25 Гц) для забезпечення охолодження двигуна.

Для регулювання роботи насосів системи поливу необхідно забезпечити ПІ-закон регулювання за тиском, а також передбачити байпасування у випадку аварій (розриву трубопроводів і фітінгів). Необхідно встановлювати мінімальну швидкість обертання для запобігання виникненню у насосі кавітації, яка як правило, складає близько 20–30 % від номінальної. Це

визначає фактичну глибину регулювання методом VFD у таких системах. Для більшої глибини як правило використовують комбіновані методи регулювання на основі VFD та, наприклад, дроселювання або повороту лопаток дифузору відцентрового вентилятора.

Систему автоматичного регулювання на основі VFD необхідно забезпечувати вхідним дроселем, ЕМС-фільтром, екрануванням кабелів живлення двигуна, ПЗП на ввіді щита, а також перевіряти селективність захистів та струмів витоку. Це дозволить забезпечити якість електроенергії і тривалий ресурс роботи електрообладнання.

Система автоматичного регулювання повинна мати елементи моніторингу: споживання електроенергії, гармонічних спотворень струму, величини напруги, кількості пусків, температури обмоток двигунів тощо. Також необхідно періодично оновлювати налаштування регульованих параметрів залежно від періоду сезону.

Використана у роботі математична модель показує, що для прийнятих параметрів тепличного господарства VFD знижує добове електроспоживання приводами систем вентиляції та поливу приблизно на 50–55 %, переважно внаслідок кубічного характеру залежності потужності від швидкості, тобто за рахунок зменшення втрат тиску. Додаткові системні ефекти такого заходу – суттєве зменшення пускових струмів, плавний запуск та зупинка, зменшені шум і вібрація, зниження механічного зносу обладнання. Наявні також негативні фактори – поява гармонік струму та необхідність правильної фільтрації і підбору захистів. З урахуванням отриманих результатів доцільним є поетапне впровадження VFD на вентиляторах теплиці і насосних агрегатах із налаштуванням контурів керування під реальні добові профілі температури повітря та тиску води, що забезпечить істотне скорочення електроспоживання та підвищить надійність експлуатації.

6.3 Розрахунок і вибір обладнання сонячної електростанції

Тип станції – мережева з пріоритетом на власне споживання.

Виробництво електричної СЕС $E_{pvc} = 8943,4 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$.

Розміщення геліополя – дах будинку господарства.

Орієнтація – південь, без затінення.

Кут нахилу сонячних панелей 35° .

Регіон розміщення – Сумська область.

Коефіцієнт запасу, що враховує зменшення генерації за слабкої інсоляції, зменшення «обрізань» улітку деградацію панелей, засніження взимку тощо, $k_{DC/AC} = 1,1$.

Питома річна інсоляція для території Сумської області $Y_{inc} = 1100 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$.

Необхідна потужність геліополя

$$P_{DC.min} = \frac{E_{pvc}}{Y_{inc}} = \frac{8943,4}{1100} = 8,13 \text{ кВт}.$$

З урахуванням коефіцієнту запасу необхідна потужність геліополя складе

$$P_{DC} = k_{DC/AC} \cdot P_{DC.min} = 1,1 \cdot 8,13 = 8,94 \text{ кВт}.$$

Підбір панелей і конфігурація масивів

Обираємо сучасний модуль потужністю 430–450 Вт із помірною напругою та струмом, JA Solar JAM54S31-440, що має такі технічні характеристики:

$$P_{mpp} = 440 \text{ Вт}; \quad U_{mpp} = 41 \text{ В}; \quad I_{mpp} = 10,7 \text{ А}; \quad U_{oc.25} = 50 \text{ В}; \quad I_{sc} = 13 \text{ А};$$

$$\alpha_{V_{oc}} = -0,28\% / ^\circ \text{C}.$$

Необхідна кількість модулів

$$N = \frac{P_{DC}}{P_{mpp}} = \frac{8940}{440} \approx 20 \text{ шт.}$$

Вибір кількості стрингів і перевірка напруги U_{oc} на зниження температури

Для межі постійного струму напругою 1000 В та найнижчої температури ($\theta_{\min} = -25^\circ \text{C}$) у регіоні розміщення СЕС

$$\begin{aligned} U_{oc.\theta_{\min}} &= U_{oc.25} \cdot \left[1 + |\alpha_{U_{oc}}| \cdot (25 - \theta_{\min}) \right] = \\ &= 50 \cdot \left[1 + |-0,0028| \cdot (25 - (-25)) \right] = 57 \text{ В}. \end{aligned}$$

Максимальна кількість модулів у стрингу

$$M_{\max} = \frac{1000}{U_{oc.\theta_{\min}}} = \frac{1000}{57} = 17.$$

Обираємо 2 стринги по $M = 10$ модулів (JA Solar JAM54S31-440), що забезпечить безпечну напругу та допустимі струми.

Робочі напруга та струм у стрингу

$$U_{mpp.cmp} = 10 \cdot 41 = 410 \text{ В}; I_{cmp} = I_{mpp} = 10,7 \text{ А}.$$

Найбільше значення струму у стрингу $I_{\max.cmp} = I_{sc} = 13 \text{ А}$.

Вибір інвертора

З урахуванням трифазного вводу 0,4 кВ ($3 \times 230/400 \text{ В}$) і дозволеної потужності 16 кВт обираємо мережевий трифазний інвертор Huawei SUN2000-8KTL-M1, що має такі технічні характеристики: 2 виходи МРРТ, максимальна потужність на стороні постійного струму 12 кВт, номінальна потужність інвертора 8,8 кВт, максимальна сила струму на МРРТ $I_{MPPT} = 13,5 \text{ А}$, діапазон робочих напруг $U_{mpp} = 200 - 980 \text{ В}$).

Очікувана генерація підбраного обладнання СЕС

$$E_{річ}^{інв} = Y_{інс} \cdot P_{ном.інв} / k_{DC/AC} = 1100 \cdot 8,8 / 1,1 = 8800 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік},$$

що відрізняється від розрахункового електроспоживання на 1,6 % та є допустимим.

Електробезпека, захист та кабелі

1) Ділянка ланцюга постійного струму (до інвертора)

Запобіжники, що встановлюються на кожен стринг, підбираємо за $I_{\max.стп} = I_{sc} = 13 \text{ А}$. Обираємо плавку вставку на номінальне значення струму 15 А gPV, $U_{DC} \geq 1000 \text{ В}$.

Автоматичні вимикачі постійного струму біля інвертора (категорія DC-PV, $U \geq 1000 \text{ В}$, АВВ I $\geq 32 \text{ А} \gg I_{sc} = 13 \text{ А}$).

ПЗІП (SPD) на стороні постійного струму: тип II, $U_{cpv} = 1200 \text{ В}$, встановити біля інвертора; за довгих ліній — додатково в польовому боксі.

Кабелі PV: мідь, максимальна робоча температура 90 °С, Н1Z2Z2-К 4 мм², чорні/червоні, стійкий до впливу ультрафіолетового випромінювання.

Перевірка PV кабелю по струму: для перерізу 4 мм² (мідь) допустима сила струму 35 А при 90 °С, тому для фактичного максимального значення 13 А кабель обраний вірно.

Перевірка падіння напруги PV кабелю

$$\Delta U_{DC} = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \rho}{S \cdot U} \cdot 100\% = \frac{2 \cdot 30 \cdot 13 \cdot 0,0175}{4 \cdot 410} \cdot 100\% = 0,9\% < 1,5\%,$$

отже, на ділянці постійного струму кабель підбрано вірно.

Підбираємо конектори MC4-сумісні з сертифікацією TUV/EN.

2) Ділянка ланцюга змінного струму (після інвертора)

Підбираємо автоматичний вимикач трифазний, з характеристикою С: для номінальною потужністю $8,8 \text{ кВт}$ при напрузі 400 В струм складе

$$I_{AC} = P_n / (U_n \cdot \sqrt{3}) = 8800 / (400 \cdot \sqrt{3}) = 12,7 \text{ А}.$$

Підбираємо АВ на номінальний струм 16 А .

ПЗП на стороні змінного струму: тип II трифазний, номінальна напруга 400 В зі встановленням у щиті підключення інвертора.

ПЗВ: для трансформаторних інверторів обираємо тип А, струм витоку 30 мА .

Кабель ланцюга змінного струму (інвертор \rightarrow розподільчий щит): матеріал мідь, переріз $5 \times 4 \text{ мм}^2$ (L1/L2/L3/N/PE) за довжини до 30 м .

При цьому падіння напруги

$$\Delta U_{AC} = \frac{L \cdot I \cdot \rho}{S \cdot U} \cdot 100\% = \frac{30 \cdot 12,7 \cdot 0,0175}{4 \cdot 400} \cdot 100\% = 0,4\% < 1\% ,$$

отже, на ділянці постійного струму кабель підібрано вірно.

3) Заземлення та зрівнювання потенціалів

Обов'язкове під'єднання рам і інших металевих конструкцій до грозозахисного пристрою. Підбираємо мідний провідник перерізом 16 мм^2 для забезпечення опору до 4 Ом .

Необхідно забезпечити гальванічний контакт із струмопровідними елементами (нержавіючі стропи, клеми тощо) та корозійну сумісність матеріалів.

У табл. 6.5 подано зведену таблицю підібраних елементів СЕС.

Таблиця 6.5 – Параметри елементів СЕС приватного домогосподарства

Елемент СЕС	Модель/марка	Основні технічні характеристики	Кіл-ть	Ціна за од., грн*
Фотоелектричні модулі	JA Solar JAM54S31-440	$P_{mpp} = 440 \text{ Вт};$ $U_{mpp} = 41 \text{ В};$ $I_{mpp} = 10,7 \text{ А};$ $U_{oc.25} = 50 \text{ В}; I_{sc} = 13 \text{ А};$ $\alpha_{V_{oc}} = -0,28\% / ^\circ \text{C}$	20	4200
Інвертор мережевий, трифазний	Huawei SUN2000-8KTL-M1	$8,8 \text{ кВт АС}; 2 \times \text{MPPT};$ $U_{mpp} = 200 - 980 \text{ В};$ сила струму MPPT до $2 \times 13,5 \text{ А}; \text{Wi-Fi/FE};$ export-limit	1	85000
Лічильник електроенергії для export-limit	Huawei DTSU666-H (трифазний smart-meter)	вимірювання енергії та потужності, інтеграція з інвертором	1	6500
Smart-Dongle	Smart Dongle WLAN-FE	підключення до інтернет	1	3000
Запобіжник DC	gPV запобіжники +/-, DC-вимикач, SPD тип II	на 2 стринги; $U_{DC} \geq 1000 \text{ В};$ $I_{ном} = 15 \text{ А}$	1 компл.	10000
Вимикач-роз'єднувач DC (біля інвертора)	ABB (DC-категорія)	$U_{DC} \geq 1000 \text{ В}; I \geq 32 \text{ А}$	1	2500
ПЗП (SPD) на АС	Тип II, трифазний, 400 В	захист від імпульсних перенапруг на стороні АС	1 компл.	3500
Автоматичний вимикач АС	MCB 3P C16	для лінії інвертора	1	400

Продовження табл. 6.5

Елемент СЕС	Модель/марка	Основні технічні характеристики	Кіл-ть	Ціна за од., грн*
ПЗВ (тип А відповідно до інструкції інвертора)	ABB	4P, 40 А, 30 мА, тип А	1	1600
Кабель PV H1Z2Z2-K (черв./чорн.)	EN, мідь, 4 мм ²	200 м, UV/ozone-resistant	200 м	45
Конектори MC4	—	пари для підключень, подовжень	10 пар	250
Кабель АС до щита	5×4 мм ² , мідь	L1-L2-L3-N-PE	30 м	220
Заземлення, шина ГЗШ	провід мідь, 16 мм ² + аксесуари	під'єднання рам, інвертора, боксів	20 м	380
Заземлювальні електроди	стержні Ø16 мм, оміднені, довжина 1,5 м	контур заземлення	3 шт	1200
Кріплення (дах/грунт)	K2	профілі, клеми, анкери, неірж. кріплення	20 мод.	1200
Маркування/знаки безпеки	Наклейки «PV-DC», «AC PV», таблички	відповідно до правил	1 компл.	800

Висновки з розділу 6

Отже, у роботі було проаналізовано вплив таких енергозберігаючих заходів як перехід на опалення теплиці від теплового насосу, заміна ДНаТ ламп на фіто-LED у теплиці та досліджено вплив регулювання електроприводу систем поливу і вентиляції теплиці із розрахунком економії. Обрані енергозберігаючі заходи фактично визначають найбільші складові енерговитрат приватного домогосподарства. За результатами розрахунків при базовому енергоспоживанні господарства 17568,6 кВт·год/рік застосування

заміни ДНаТ ламп на фіто-LED у теплиці дає економію 2850,4 $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ (16,2 %), перехід на опалення теплиці від теплового насосу дає економію 4174,5 $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ (23,8 %), а використання регульованого електроприводу дозволяє заощадити 1600,3 $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ (9,1 %). При одночасному запровадженні всіх розглянутих енергозберігаючих заходів зменшення енергоспоживання складе 49,1 %. Під залишкове навантаження (8943,4 $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$) виконано розрахунок і підбір елементів сонячної електростанції (див. табл. 6.4).

7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

У розділі розглянуто економічне підґрунтя одного з енергозберігаючих заходів, мова про які йшла у попередньому розділі, а саме зниження питомих витрат електроенергії на досвічування без втрати фотонного потоку для рослин. Світлодіодні фітосвітильники GreenPower LED Toplighting Compact (dimnable) забезпечують вищу світлову і фотонну ефективність, керування інтенсивністю і стабільніший спектр протягом життєвого циклу порівняно з ДНаТ-джерелами. У техніко-економічному розрахунку порівнюються базова система ДНаТ та нова система LED з урахуванням вартості придбання, монтажу, демонтажу, а також планових замін упродовж розрахункового горизонту.

Відповідно до розрахунків попереднього розділу було отримано:

- базовий варіант – ДНаТ світильники Philips GreenPower HPS 600W EL у кількості 10 шт.;
- енергозберігаюче рішення – фіто-LED світильники Philips GreenPower LED Toplighting Compact (dimnable) у кількості 18 шт.;
- річна економія від впровадження заходу $\Delta E = 2850,4 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії.

Додатково:

- тариф на електроенергію для населення $T = 4,32 \text{ грн} / (\text{кВт}\cdot\text{год})$;
- річна ставка дисконту $r = 10\%$;
- термін життя проекту 20 років;
- ДНаТ світильник Philips GreenPower HPS 600W EL має ресурс 10–16 тис. год, на практиці – заміна кожні 12 тис. год; вартість лампи близько 1800 грн/шт, вартість робіт зі заміни близько 300 грн/шт, що для 18 світильників за 1 цикл складає 37800 грн.
- LED Toplighting Compact має номінальний ресурс понад 36–50 тис. год до L90; планової заміни протягом терміну життя проекту при напрацюванні до 2500 год/рік здебільшого не потребують; закладено 10 %

ризик заміни драйвера, що має 15 % вартості світильника упродовж 20 років.
Ціна світильника 20000 грн/шт.

Монтаж LED світильника і підключення димінгу DALI/0–10 В, налаштування – 8 % від вартості світильників.

Демонтаж 18 ДНаТ-світильників і утилізація ламп: 5 % від вартості LED-комплекту.

Чиста приведена вартість

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (7.1)$$

де r – ставка дисконту;

n – горизонт, років;

I_0 – початкові капіталовкладення

$$I_0 = CAPEX = C_{LED} + C_{LED.монт} + C_{ДНаТ.демонт}, \quad (7.2)$$

C_{LED} – вартість LED-світильників;

$C_{LED.монт}$ – вартість монтажу LED-світильників та підключення керування;

$C_{ДНаТ.демонт}$ – вартість демонтажу ДНаТ-світильників і утилізація ламп;

CF_t – чистий річний грошовий потік у році t , який розраховують за виразом

$$CF = S_{ел} + C_{ДНаТ, рік} - C_{LED, сервіс. рік}, \quad (7.3)$$

де $S_{ел}$ – економія на електроенергії

$$S_{ел} = \Delta E \cdot T, \quad (7.4)$$

T – тариф на електроенергію;

ΔE – економія електроенергії від запровадження заходу;

$C_{\text{ДНaT}, \text{pik}}$ – уникнені витрати на планові заміни ДНaT ламп;

$C_{\text{LED}, \text{сервіс}, \text{pik}}$ – річна ризикова і сервісна компонента при експлуатації LED світильників.

Простий строк окупності

$$PP = \frac{I_0}{CF}. \quad (7.5)$$

Для рівномірних CF зручно користуватись коефіцієнтом поточної вартості ренти (ануїтету)

$$PVAF(r, n) = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r}. \quad (7.6)$$

Поточна вартість грошових потоків

$$PV(CF) = CF \cdot PVAF. \quad (7.7)$$

Дисконтований строк окупності DPP – мінімальне n , для якого

$$\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} > I_0.$$

Внутрішня норма рентабельності IRR таке r , що $NPV(r) = 0$.

Відповідно до наведеної вище моделі виконаємо розрахунки простого і дисконтованого терміну окупності для поданих вище вихідних даних, зробимо висновки та надамо практичні рекомендації зі скорочення цих термінів на прикладі нашого енергозберігаючого заходу.

Вартість LED-світильників

$$C_{LED} = 10 \cdot 20000 = 200000 \text{ грн.}$$

Вартість монтажу LED-світильників та підключення керування

$$C_{LED.монт} = 0,08 \cdot 200000 = 16000 \text{ грн.}$$

Вартість демонтажу ДНаТ-світильників і утилізація ламп;

$$C_{ДНаТ.демонт} = 0,05 \cdot 200000 = 10000 \text{ грн.}$$

Капітальні витрати (одноразові інвестиції) відповідно до (7.2)

$$I_0 = 200000 + 16000 + 10000 = 226000 \text{ грн.}$$

Економія на електроенергії відповідно до (7.4)

$$S_{ел} = 2850,4 \cdot 4,32 = 12313,7 \text{ грн / рік.}$$

Уникнені витрати на планові заміни ДНаТ (18 ламп):

$$C_{ДНаТ,рік} = \frac{37800 \cdot 3}{20} = 5130 \text{ грн / рік.}$$

Ризиковий/сервісний компонент LED:

$$C_{LED,сервіс.рік} = 0,1 \cdot 0,15 \cdot 20000 = 300 \text{ грн}$$

Чистий щорічний грошовий потік

$$CF = 12313,7 + 5130 - 300 = 17143,7 \text{ грн / рік.}$$

Коефіцієнт поточної вартості ренти для анuitету при $r = 10\%$ і $n = 20$ років

$$PVAF(10\%, 20 \text{ років}) = \frac{1 - (1 + 0,1)^{-20}}{0,1} = 8,5136.$$

Вартість грошових потоків

$$PV(CF) = 17143,7 \cdot 8,5136 = 145954,6 \text{ грн.}$$

Простий строк окупності

$$PP = \frac{226000}{17143,7} = 13,2 \text{ року.}$$

Результати розрахунків по кожному року зводимо до табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Економічні показники проекту

Рік	$CF, \text{ грн}$	Коеф. дисконту $1/(1+r)^t$	Дисконтований $CF, \text{ грн}$	Накопичений дисконтований $CF, \text{ грн}$	NPV на кінець року, грн
1	17143,7	0,909091	15585,18	15585,18	-210414,82
2	17143,7	0,826446	14168,35	29753,53	-196246,47
3	17143,7	0,751315	12880,32	42633,84	-183366,16
4	17143,7	0,683013	11709,38	54343,22	-171656,78
5	17143,7	0,620921	10644,89	64988,11	-161011,89
6	17143,7	0,564474	9677,17	74665,28	-151334,72
7	17143,7	0,513158	8797,43	83462,71	-142537,29

Продовження табл. 7.1

Рік	$CF, \text{ грн}$	Коеф. дисконту $1 / (1 + r)^t$	Дисконтований $CF, \text{ грн}$	Накопичений дисконтований $CF, \text{ грн}$	NPV на кінець року, грн
8	17143,7	0,466507	7997,66	91460,37	-134539,63
9	17143,7	0,424098	7270,6	98730,98	-127269,02
10	17143,7	0,385543	6609,64	105340,62	-120659,38
11	17143,7	0,350494	6008,76	111349,38	-114650,62
12	17143,7	0,318631	5462,51	116811,89	-109188,11
13	17143,7	0,289664	4965,92	121777,81	-104222,19
14	17143,7	0,263331	4514,47	126292,28	-99707,72
15	17143,7	0,239392	4104,07	130396,35	-95603,65
16	17143,7	0,217629	3730,97	134127,31	-91872,69
17	17143,7	0,197845	3391,79	137519,1	-88480,9
18	17143,7	0,179859	3083,45	140602,55	-85397,45
19	17143,7	0,163508	2803,13	143405,68	-82594,32
20	17143,7	0,148644	2548,3	145953,98	-80046,02

Внутрішня норма рентабельності складає $IRR = 4,35\%$ / рік на 20-тий рік.

Умова $\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} > I_0$ не виконується навіть для $n = 20$ років (

$NPV = -80046,02 \text{ грн} < 0$ на кінець 20-го року), тому дисконтований строк окупності DPP є не досяжним протягом терміну життя проекту.

Дисконтований строк окупності DPP за $r = 10\%$ максимальна межа

$PVAF$ при $n \rightarrow \infty - 1/r = 10$, що менше необхідного $\frac{I_0}{CF} \approx 13,19$.

Розглянемо способи зменшення терміну окупності:

1) Зменшенням ставки дисконтування. Досягнути дисконтованого строку окупності при $\frac{I_0}{CF} \approx 13,19$ можна лише зменшенням ставки дисконтування, тобто $r_{\max} = 1/13,19 = 0,076 = 7,6\%$.

2) Зменшення капітальних вкладень за рахунок вибору більш дешевих світильників-аналогів. Було порівняно характеристики світильників: Mars Hydro FC-E4800 (480 Вт; PPF = 1340 мкмоль/с; 16000 грн/шт.); Spider Farmer SE5000 (480 Вт; PPF = 1350 мкмоль/с; 20000 грн/шт.); Lumatek ATS 300W Pro 2.7 (300 Вт; PPF = 816 мкмоль/с; 19000 грн/шт.); Zeus 600W Pro 2.9 (620 Вт; PPF = 1800 мкмоль/с; 25000 грн/шт.). Серед всіх аналогів найкраще співвідношення вартість/PPF має обраний світильник Philips GreenPower LED Toplighting Compact (dimnable) (20000/1750 = 11,43 грн/(мкмоль/с) при аналогічному класу захисту IP. Найближчий за цим показником є Mars Hydro FC-E4800 (16000/1340 = 11,94 грн/(мкмоль/с), однак він не має необхідного спектру світла, що використовується для вирощування рослин, та не має необхідного IP. Отже, з позицій техніко-економічного аналізу світильник підібраний раціонально.

3) Збільшення агрономічного ефекту, який дозволяє отримати приріст доходу за рахунок збільшення врожайності або зменшення відбракованих плодів (підвищення якості продукції) як додатковий грошовий потік. Наприклад, у даному випадку збільшення грошового потоку на 10000 грн/рік за рахунок агро-ефекту дозволяє отримати $NPV > 0$; $IRR > 10\%$ / рік; $DPP \approx 20$ років. При збільшенні грошового потоку на 20000 грн/рік за рахунок агро-ефекту отримуємо $NPV \gg 0$; $IRR > 20\%$ / рік; $DPP < 15$ років.

На практиці досягнути агро-ефекту можна за рахунок:

– встановлення цільового DLI по фазах, що сприяє активному розвитку розсади та дорослих рослин, покращенню їх продуктивності під час плодоношення;

- використання димінгу за розкладом за рахунок використання алгоритму DLI-tracking з пріоритетом на ранкових та після полуденних годинах освітлення, а також зменшувати підсвічування рослин у ясні дні;
- підвищення коефіцієнта рівномірності освітленості $CU \geq 0,80-0,85$;
- використання коректних спектрів освітлення; як базовий використовують R:B ~ 4:1; додатково EOD-FR протягом 10–15 хв протягом дня для правильності формування листка;
- правильний підбір параметрів мікроклімату (вентиляція і полив) залежно від інтенсивності світла – за рахунок використання VPD-карти;
- ведення журналу обліку та аналітики: щотижня оцінюють врожайність, брак, середню масу плодів, їх колір, форму, органолептичні показники, дата першого збору врожаю; щодня розраховують або вимірюють DLI, PAR, CO₂, VPD, що в подальшому дозволяє для конкретної локації теплиці і культур впродовж 1–2 сезонів накопичити власні оцінні характеристики, що дозволить у подальшому досить точно прогнозувати економічний ефект.

Висновки з розділу 7

У розділі виконано порівняльну економічну оцінку заміни ДНаТ-світильників на світлодіодні фітосвітильники для тепличної досвітки з урахуванням капітальних витрат, експлуатаційних витрат і строку служби обладнання. На підставі вихідних даних і розрахункових залежностей встановлено, що за тарифних і вартісних припущень базовий енергетичний ефект (економія електроенергії $2,85 \text{ MВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$) сам по собі не забезпечує позитивної NPV при ставці дисконту 10 % у 20-річному горизонті, однак застосування димінгу з відстеженням DLI, підвищення рівномірності PPFД та інтеграція із системами мікроклімату дозволяють сформувати додатковий агрономічний ефект (приріст урожайності і зменшення браку), який покращує фінансові показники проекту. Паралельне впровадження VFD у вентиляції та поливі знижує питомі витрати електроенергії на допоміжні процеси та скорочує пускові навантаження.

Переваги LED-світильників полягають у більшій фотонній ефективності, стабільності спектра, можливості керування і високому ступені захисту, що в сукупності зменшує питомі витрати на 1 кг товарної продукції за умови коректної інтеграції з системами автоматизації та впровадженням VFD у вентиляції і поливі [1, 4, 8, 10].

8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Ефективна інтеграція альтернативних джерел енергії та автоматизованих систем керування у приватному господарстві вимагає дотримання сучасних вимог електробезпеки, пожежної та вибухопожежної безпеки, гігієнічних норм умов праці, а також планування реагування на надзвичайні ситуації. Нормативною основою для проєктування, монтажу та експлуатації є національно адаптовані стандарти HD 60364 для електроустановок, EN/IEC 60079 для вибухонебезпечних середовищ, ДБН щодо пожежної безпеки, санітарні норми мікроклімату, шуму та вібрації, а також Кодекс цивільного захисту України [83; 86].

8.1 Електробезпека

Захист від ураження електричним струмом у господарстві, що має ФЕС/ESS, теплицю та кормоцех, реалізується комбінацією основного захисту (ізоляція, ступені захисту оболонки, SELV/PELV у вологих зонах) та захисту при появі напруги на відкритих провідних частинах (автоматичне вимкнення живлення в системах TN/TT із застосуванням ПЗВ або МСЗ). Вимоги до допустимих напруг дотику, тривалості автоматичного вимкнення (0,2–0,4 с для кінцевих кіл низької напруги) та критеріїв $R_a \cdot I_a \leq 50 \text{ В}$ для систем TT встановлені HD 60364-4-41, загальні принципи – EN 61140. Вибір та монтаж заземлювачів, головних та додаткових вирівнювальних провідників, блискавкозахист і вимоги до провідників PE регламентовано HD 60364-5-54. Селективність ПЗВ та МСЗ забезпечується каскадуванням уставок і часових затримок, з урахуванням джерел зворотного живлення (інвертори ФЕС/ESS), – за HD 60364-5-53 і розділом 7-712 для PV. На етапах експлуатації і обслуговування необхідно виконувати «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (НПАОП 40.1-1.21-98) та ПУЕ (ред. 2017), у т.ч. перевірки кола «фаза-нуль/земля», випробування ПЗВ і протоколювання вимірювань опору заземлення. [87]

8.2 Пожежна безпека

Протипожежні рішення спираються на ДБН В.1.1-7:2016 (загальні вимоги до пожежної безпеки будинків і споруд) і НАПБ А.01.001-2014 (організаційні заходи, первинні засоби пожежогашіння, інструктажі). Для ФЕС – застосування модулів, сертифікованих за EN/IEC 61730, виконання вимог EN 62446-1 щодо документації, маркування ланцюгів постійного струму, запобіжних роз'єднувачів, засобів відсікання та СПЗ відповідних класів. Для літій-іонних АКБ – дотримання вимог безпеки за EN 62619 (вентиляція, температурний моніторинг, протипожежні відсіки, управління тепловими подіями). У теплицях і кормоцеху визначається категорія приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою з урахуванням пилу, парів органічних розчинників, наявності горючих матеріалів; обираються вогнестійкі огорожувальні конструкції, секціонування, евакуаційні шляхи, стаціонарні/переносні засоби пожежогашіння (порошкові, вуглекислотні) і системи виявлення пожежі. Знаки безпеки, плани евакуації та маркування засобів пожежогашіння виконуються за ДСТУ EN ISO 7010. [83; 84]

8.3 Параметри мікроклімату

Робочі місця у тепличному господарстві та кормоцеху повинні відповідати санітарним нормам мікроклімату (ДСН 3.3.6.042-99), шуму, ультразвуку й інфразвуку (ДСН 3.3.6.037-99), загальної та локальної вібрації (ДСН 3.3.6.039-99). Для теплиць важливі допустимі діапазони температури, вологості і швидкості повітря залежно від категорії робіт; у кормоцеху – обмеження еквівалентних рівнів шуму та спектрів вібрації, що досягаються шляхом вибору тихохідних редукторів, балансування робочих органів, антивібраційних опор. Освітленість робочих місць всередині приміщень нормується ДСТУ EN 12464-1, для відкритих площадок – ДСТУ EN 12464-2; проєктні рішення узгоджують із ДБН В.2.5-28:2018. Усі робочі місця та

евакуаційні шляхи маркуються відповідними знаками безпеки за ДСТУ EN ISO 7010. [83]

8.4 План реагування на надзвичайні ситуації

План реагування на надзвичайні ситуації (НС) розробляється відповідно до Кодексу цивільного захисту України і включає визначення сценаріїв ризику (пожежа у щиті/інверторній, термічний інцидент ESS, витік/спалах біогазу, повінь/затоплення машинного приміщення, тривала відмова зовнішнього електроживлення), матрицю відповідальності, порядок оповіщення та взаємодії з ДСНС з обленерго, маршрути евакуації та пункти збору тощо. Для критичних навантажень життєзабезпечення (насоси водопостачання, вентиляція біогазового приміщення, охоронно-пожежна сигналізація, сервер/HEMS) передбачаються резервні джерела: ESS з режимом backup із селективним АВР та дизель-генератор (за потреби) з автоматичним запуском, газоаналізатори і обмежувачі пускових струмів. Регулярні навчання, протипожежні тренування та перевірка працездатності засобів безпеки фіксуються у журналах. [84; 86]

8.5 Розрахунок системи захисного заземлення та головної системи зрівнювання потенціалів

Виконаємо розрахунок системи захисного заземлення та головної системи зрівнювання потенціалів для об'єкта з житловим будинком, теплицею 96 м² та дільницею кормоприготування. Мета розрахунку – забезпечити автоматичне відключення живлення при пошкодженні ізоляції, обмежити напругу дотику до безпечних значень та виконати вимоги чинних норм (HD 60364-5-54/ДСТУ, HD 60364-7-712; ДСТУ EN 50160 щодо якості напруги; ДСТУ EN 62305 – координація з блискавкозахистом; для ФЕС – ДСТУ HD 60364-7-712, ДСТУ EN 62446-1). Для побутових та технологічних груп із підвищеним ризиком (вологі приміщення, теплиця, металеві конструкції) застосовується захисне відключення ПЗВ типу А із чутливістю 30 мА (розетки/переносні споживачі)

та 100 мА (ввідні чи групові лінії), що дозволяє прийняти заземлювач за схемою ТТ для контуру електроопалення теплиці або локально дублювати TN-S головним заземлювачем на вводі будинку. [87]

Вихідні дані

Система електропостачання об'єкта: 0,4 кВ, 3×230/400 В, 50 Гц; на вводі – головна заземлювальна шина (ГЗШ) з під'єднанням до локального заземлювача.

Тип ґрунту: суглинок; приймаємо питомий опір ґрунту $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; сезонний коефіцієнт $\psi = 1,3$ (зимова поправка).

Режим заземлення для системи електроопалення теплої підлоги теплиці і металоконструкцій: ТТ з ПЗВ 30 мА (розетки, переносні механізми) і 100 мА (групи).

Мета: досягти опору розтікання $R_a \leq 10 \text{ Ом}$ для стабільної роботи ПЗВ та координації із ПЗП, при цьому умова $I_{\Delta n} R_a \leq 50 \text{ В}$ повинна виконуватись для всіх ПЗВ.

Опір вертикального заземлювача (стрижня) довжиною L , діаметром d

$$R_{cm} \approx \frac{\rho \cdot \psi}{2\pi \cdot L} \cdot \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) - 1 \right], \quad (8.1)$$

де ρ – питомий опір ґрунту, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

ψ – сезонний коефіцієнт;

L – довжина стрижня, м ;

d – діаметр, м ;

R_{cm} – опір стрижня, Ом .

Еквівалентний опір системи з n однакових стрижнів, рознесених на відстань $a \geq 2L$ (щоб зменшити взаємний вплив)

$$R_{\Sigma(cm)} \approx \frac{R_{cm}}{\eta \cdot n}, \quad (8.2)$$

де η – коефіцієнт використання (0,6–0,9 залежно від геометрії; для трикутника з трьох електродів задаються $\eta \approx 0,62$).

Опір горизонтального кільцевого заземлювача (сталеві смуги) довжиною L_k (периметр), завглибшки h і шириною b :

$$R_k \approx \frac{\rho \cdot \psi}{2\pi \cdot L_k} \cdot \ln\left(\frac{8L_k}{b + 2 \cdot h}\right). \quad (8.3)$$

Паралельне з'єднання елементів заземлювача

$$R_A \approx \left(\frac{1}{R_{\Sigma(cm)}} + \frac{1}{R_k} \right)^{-1}. \quad (8.4)$$

Критерій безпеки для ТТ-схеми з ПЗВ (за умовою безпечної напруги дотику $U_T \leq 50V$ у нормальних умовах):

$$I_{\Delta n} R_a \leq 50V. \quad (8.5)$$

де $I_{\Delta n}$ – номінальний диференційний струм ПЗВ, А.

Мінімальні перерізи провідників:

- головний заземлювальний провідник (між ГЗШ і заземлювачем) мідного $\geq 16 \text{ мм}^2$ (або сталева смуга $40 \times 4 \text{ мм}$);
- головне зрівнювання потенціалів – мідного $\geq 6 \text{ мм}^2$;
- РЕ у групових лініях – відповідно до НД 60364-5-54 залежно від перерізу фазного провідника та способу прокладання.

Розрахунок

1) Вертикальні електроди. Задаємося трьома стержнями з обмідненої сталі $d = 16 \text{ мм}$, $L = 3 \text{ м}$ із взаємним рознесенням $a = 6 \text{ м}$ по вершинах трикутника біля теплиці.

Розраховуємо параметри

$$\rho \cdot \psi = 100 \cdot 1,3 = 130 \text{ Ом} \cdot \text{ м}; \quad d = 0,016 \text{ м}.$$

Опір одного стержня

$$R_{cm} = \frac{130}{2\pi \cdot 3} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot 3}{0,016} \right) - 1 \right] = 38,8 \text{ Ом}.$$

Ураховуючи коефіцієнт використання $\eta \approx 0,62$ для трикутника із трьох стержнів

$$R_{\Sigma(cm)} = \frac{38,8}{0,62 \cdot 3} = 20,9 \text{ Ом}.$$

2) Кільцевий заземлювач для теплиці. Прокладаємо сталеву смугу $40 \times 4 \text{ мм}$ по периметру теплиці ($8 \times 12 \text{ м}$), отримаємо довжину $L_{\kappa} \approx 40 \text{ м}$.

Глибина $h = 0,7 \text{ м}$, ширина $b = 0,04 \text{ м}$

$$R_{\kappa} = \frac{130}{2\pi \cdot 40} \cdot \ln \left(\frac{8 \cdot 40}{0,04 + 2 \cdot 0,7} \right) = 2,8 \text{ Ом}.$$

3) Еквівалентний опір заземлювача

$$R_a = \left(\frac{1}{20,9} + \frac{1}{2,8} \right)^{-1} = 2,47 \text{ Ом}.$$

4) Перевірка умови для ТТ з ПЗВ.

Для розеткових кіл з ПЗВ $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$:

$$I_{\Delta n} R_a = 0,03 \cdot 2,47 = 0,074 \text{ B} \ll 50 \text{ B}.$$

Умову виконано.

Для групових кіл з ПЗВ $I_{\Delta n} = 100 \text{ mA}$

$$I_{\Delta n} R_a = 0,1 \cdot 2,47 = 0,247 \text{ B} \ll 50 \text{ B}.$$

Умову виконано.

Підбір конструктивних елементів та апаратури

Заземлювачі: стержні сталеві оміднені $\varnothing 16 \text{ мм}$, $L=3 \text{ м}$, різьбові секції з муфтами; кількість – 3 шт; смуга сталева $40 \times 4 \text{ мм}$ (гаряче цинкування) по периметру теплиці 40 м; з'єднання термозварюванням або сертифікованими хомутами.

Головна заземлювальна шина (ГЗШ): мідна, на ізоляторах, з відгалуженнями на РЕ, PEN, систему зрівнювання потенціалів.

Провідники: головний заземлювальний провідник мідний перерізом 16 мм^2 , головне зрівнювання потенціалів виконане з мідного проводу перерізом 6 мм^2 ; до металоконструкцій теплиці – мідний провід перерізом 6 мм^2 .

ПЗВ: тип А, 30 mA для розеткових та переносних механізмів у теплиці і кормоцеху; 100 mA селективні – для ввідних і групових; модель Schneider Electric Acti9 iID.

АВ та захист ліній: автоматичні вимикачі з характеристикою С для навантажень асинхронних двигунів (сила струму 16 А з координацією з ПЗВ).

ПЗП: для вводу АС – тип 2 (Т2) $U_c = 275V$; для ланцюгів ФЕС – комбіновані Т1+Т2 на DC-стороні з узгодженням напруги $U_{cрv}$ відповідно до ДСТУ EN 61643/HD 60364-7-712, ДСТУ EN 62446-1.

Контроль: вимірювання опору заземлювача методом 3-полюсної схеми, клас точності приладу не нижче 1; періодичний контроль раз на рік та після виконання робіт.

Отриманий розрахунковий $R_a = 2,47 Ом$ має значний запас відносно практично досяжних 10–30 Ω для малих об'єктів. Це особливо корисно для стабільної роботи ПЗП і зменшення потенціалів під час імпульсних процесів (блискавка, комутаційні перенапруги). Для заземлення типу TN-C-S на вводі будинку обов'язкове повторне заземлення PEN. Усі сторонні провідні частини в теплиці та кормоцеху приєднуються до ГЗШ через головну і додаткову систему зрівнювання потенціалів (трубопроводи, металокаркас, лотки, корпуси машин). [87]

Висновки з розділу 8

У розділі розглянуто питання електробезпеки, пожежної безпеки, впливу параметрів мікроклімату, підходи до планування реагування на надзвичайні ситуації, а також наведено розрахунок системи захисного заземлення та головної системи зрівнювання потенціалів.

Запропонована конфігурація заземлювача (три вертикальні електроди довжиною 3 м у поєднанні з кільцевою смугою 40×4 мм по периметру теплиці) забезпечує опір розтікання порядку 2,47 Ом у прийнятих умовах, що з великим запасом виконує вимогу (8.5) для ПЗВ 30 і 100 мА. Обрані перерізи провідників і номенклатура апаратури відповідають актуальним вимогам групи стандартів HD 60364, а також забезпечують координацію з ПЗП і, за наявності ФЕС, – з вимогами ДСТУ EN 62446-1. Необхідно виконати перегляд усіх сторонніх провідних частин і включити їх у систему зрівнювання потенціалів, а також провести інструментальне підтвердження R_a після монтажу та періодично в експлуатації.

ВИСНОВКИ

Робота є актуальною як з технічної, так і з прикладної точки зору, оскільки комплексно розв'язує задачу підвищення енергоефективності приватного домогосподарства фермерського типу за рахунок поєднання заходів зі зменшення споживання електроенергії, раціоналізації керування електроприводами, інтеграції ФЕМ та забезпечення нормативної електро- і пожежної безпеки. Поставлені завдання і мета роботи повністю відповідають сучасній практиці енергоефективних рішень для приватного сектору з інтегрованими альтернативними джерелами енергії.

Відповідно до вихідних даних об'єкта сформовано методичку енергетичного обстеження та створено базовий енергобаланс, а також подано характерні профілі навантаження відповідно до даних моніторингу. За їх результатами виділено найбільші статті споживання (у теплиці: досвічування, опалення, мікроклімат; у кормоцеху: циклічні технологічні операції), що дозволило створити основу для кількісної оцінки ефектів від можливого впровадження ЕЗЗ у цих енергетичних підсистемах. Для теплиці – перехід на спектрально налаштовані LED-системи з димінгом, застосування VFD на насосах і вентиляторах, використання теплових екранів та узгодження алгоритмів керування мікрокліматом. Для приводів кормоцеху – раціональний добір режимів роботи і використання керованих електроприводів.

Порівняльний огляд альтернативних джерел енергії став методичною базою для проєктних і економічних розрахунків у роботі, а також виконання числового моделювання.

Відповідно до даних розділу 6 визначено базовий річний обсяг споживання електроенергії господарства у $17568,6 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ та оцінено ефекти трьох ключових ЕЗЗ: заміна HPS на фіто-LED у теплиці забезпечує зниження споживання на $2850,4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ (16,2 %), перехід на тепловий насос для опалення теплиці – $4174,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ (23,8 %), впровадження регульованих електроприводів у системах поливу та вентиляції – $1600,3$

кВт·год/рік (9,1 %). Сукупний ефект усіх трьох заходів становить 49,1 % і приводить до залишкового енергоспоживання на рівні 8943,4 *кВт·год/рік*.

Під це залишкове навантаження виконано підбір складу мережевої СЕС, що налаштовується на пріоритет самоспоживання: 2 стринги по 10 модулів JA Solar JAM54S31-440 (забезпечення безпечних напруг і струмів), трифазний інвертор Huawei SUN2000-8KTL-M1 із двома MPPT та супутні компоненти (лічильник електроенергії, захисти DC/AC, ПЗВ типу А, ПЗІП, з'єднувальна і заземлювальна арматура).

Дослідницька частина роботи присвячена дослідженню впливу регулювання електроприводу на енергозбереження. У роботі порівняно два методи регулювання електроприводу (ON/OFF і VFD) та за результатами моделювання було показано, що перехід на частотно-регульований електропривід дозволяє суттєво скоротити електроспоживання (від 29 до 67 %) залежно від профілю електроспоживання. Окрім того, досягається суттєве зменшення пускових струмів, плавний запуск та зупинка, зменшені шум і вібрація, зниження механічного зносу електроприводів.

Економічний розділ присвячений заміні HPS на LED (з урахуванням капітальних витрат, монтажу, утилізації HPS-ламп, уникнених витрат на їх планові заміни, обслуговування роботи LED та створеної економії електроенергії). Отримано річний чистий грошовий потік $CF \approx 17143,7$ грн при ставці дисконтування 10 %. Дисконтування показує, що NPV залишається від'ємним упродовж усього терміну життя проєкту (20 років) і на кінець 20-го року становить $-80046,02$ грн. Отже, дисконтований строк окупності за взятих припущень не досягається, а IRR є нижчою за ставку дисконту. Отриманий результат, у першу чергу, пов'язаний із значною вартістю спеціалізованих фіто LED-світильників. Покращити фінансові показники може врахування як економію можливе збільшення врожайності агропродукції, що вирощується у теплиці, збільшення кількості збирання врожаю тощо (т. з. агро-ефект), а також, можливо, пошук більш дешевих аналогів світильників.

У розділі охорони праці приділено увагу електробезпеці та протипожежним аспектам у господарстві. Для вологих зон, металоконструкцій теплиці та переносних споживачів прийнято застосування ПЗВ типу А з чутливістю 30 *мА* для розеткових кіл і 100 *мА* для груп, що дає змогу реалізувати схему ТТ у контурах підлоги теплиці або дублювати TN-C-S головним заземлювачем на вводі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22 червня 2017 р. № 2118-VIII. Верховна Рада України. База даних «Законодавство України». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2118-19> (дата звернення: 23.09.2025).
2. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20 лютого 2003 р. № 555-IV (зі змінами). Верховна Рада України. База даних «Законодавство України». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/555-15> (дата звернення: 23.09.2025).
3. ДБН В.1.2-11:2021. Енергозбереження та енергетична ефективність будівель. Київ : Мінрегіон, 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074186281496872415 (дата звернення: 23.09.2025).
4. ДСТУ EN ISO 52000-1:2023 (EN ISO 52000-1:2017, IDT). Енергетичні характеристики будівель. Загальна оцінка енергетичних характеристик і визначення енергоспоживання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99188 (дата звернення: 23.09.2025).
5. ДСТУ EN ISO 52120-1:2022 (EN ISO 52120-1:2022, IDT). Енергоефективність будівель. Внесок автоматизації та керування будівлями. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105251 (дата звернення: 23.09.2025).
6. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Затверджено наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mev.gov.ua/storinka/pravy-la-ulashtuvannya-elektrostanovok> (дата звернення: 23.09.2025).
7. Duffie J. A.; Beckman W. A.; Blair N. Solar Engineering of Thermal Processes. 5th ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2020. – 928 p.

8. Messenger R. A.; Abtahi A. Photovoltaic Systems Engineering. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2017. – 504 p.
9. Turner W. C.; Doty S. Energy Management Handbook. 9th ed. Boca Raton : CRC Press, 2015. – 912 p.
10. Baudoin W.; Castilla N.; De Pascale S.; Leonardi C. та інші (ред.). Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops: Principles for Mediterranean Climate Areas. Rome : FAO, 2013. – 640 p.
11. Paris B.; Vandorou F.; Balafoutis A. T.; та інші. Energy Use in Greenhouses in the EU: A Review Recommending Energy Efficiency Measures and Renewable Energy Sources Adoption. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, Issue 10, Article 5150. DOI: 10.3390/app12105150. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agrofossilfree.eu/wp-content/uploads/2022/05/applsci-12-05150.pdf> (дата звернення: 23.09.2025).
12. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://bci.kname.edu.ua/images/News/2022-2023/Inf_bul_2_2023_Budstandart.pdf (дата звернення: 23.09.2025).
13. NYSERDA. Greenhouse Energy Best Practices Guidebook. New York, 2020. – 56 p.
14. Phileo Lesaffre. Energy efficiency in feed factories (аналітична нотатка). 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://phileo-lesaffre.com/en/energy-efficiency-in-feed-factories/> (дата звернення: 23.09.2025).
15. Adusei-Bonsu M.; et al. Performance evaluation of mechanical feed mixers using machine parameters, operational parameters and feed characteristics in Ashanti and Brong-Ahafo regions, Ghana. Alexandria Engineering Journal. 2021. DOI: 10.1016/j.aej.2021.03.061. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821002234> (дата звернення: 23.09.2025).

16. Maraveas C. Agricultural Greenhouses: Resource Management and Optimized Environments. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, Issue 7, Article 1464. DOI: 10.3390/agriculture13071464. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ideas.repec.org/a/gam/jagris/v13y2023i7p1464-d1201476.html> (дата звернення: 23.09.2025).
17. Castillo Álvarez Y.; та інші. Mathematical Model to Improve Energy Efficiency in the Feed Industry. *Processes*. 2025. Vol. 13, Issue 5, Article 1523. DOI: 10.3390/pr13051523. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/5/1523> (дата звернення: 23.09.2025).
18. Both A. J. Greenhouse Energy Efficiency and Management. Rutgers, 2022. Аналітичний огляд. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/greenhouse-energy-efficiency-and-management> (дата звернення: 23.09.2025).
19. Державна служба статистики України. Енергоспоживання домогосподарств: статистичні огляди (останнє вид.). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 26.09.2025).
20. Рагімов Т. Ю.; Дьяконов В. П. Енергоменеджмент у будівлях : навч. посіб. Київ : НАУ, 2018. – 256 с.
21. Білик В. М.; Шевченко П. О. Енергоефективність житлових будівель : монографія. Львів : Видавництво ЛНУ, 2020. – 312 с.
22. FAO. Greenhouse Crop Production: Engineering & Climate Control (technical guide). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fao.org> (дата звернення: 26.09.2025).
23. Raviv M.; Lieth J. H. *Soilless Culture: Theory and Practice*. 2nd ed. Elsevier, 2019. – 718 p.
24. Nelson P. V. *Greenhouse Operation and Management*. 8th ed. Pearson, 2017. – 784 p.
25. Singh D.; та інші. LEDs for Energy-Efficient Horticulture: A Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109889.

[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109889> (дата звернення: 24.09.2025).

26. Global Solar Atlas. Solar Resource Data for Ukraine. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://globalsolaratlas.info> (дата звернення: 26.09.2025).

27. ЕНРА. Heat Pump Key Facts & Test Regulations (EN 14511 / EN 14825). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ehpa.org> (дата звернення: 26.09.2025).

28. Thomas M.; та інші. Energy Use in Feed Pelleting. Feed Technology. 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ifif.org> (дата звернення: 26.09.2025).

29. Brouwer C.; Heibloem M. Irrigation Water Management: Pumping and Energy. FAO Irrigation and Drainage Papers, 2003. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fao.org> (дата звернення: 26.09.2025).

30. IDAE (Spain). Efficient Pumping in Irrigation Systems: Guidebook. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.idae.es> (дата звернення: 26.09.2025).

31. Kersting W. H. Distribution System Modeling and Analysis. 4th ed. CRC Press, 2018. – 455 p.

32. European Commission. Regulation (EU) 2019/2016 on Energy Labelling for Refrigeration. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu> (дата звернення: 26.09.2025).

33. Holmes D. G.; Lipo T. A. Pulse Width Modulation for Power Converters. Wiley-IEEE Press, 2003. – 744 p.

34. Viessmann. Vitocal 200-G (B0/W35) : Data Sheets & Planning Guide. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.viessmann.family> (дата звернення: 26.09.2025).

35. Thomas M.; Van der Poel A. Pellet Quality and Energy Use in Pelleting. Animal Feed Science and Technology. 2021. DOI:

10.1016/j.anifeedsci.2021.115209. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115209> (дата звернення: 24.09.2025).

36. Pansini A. J.; Small E. *Electrical Distribution Engineering*. Fairmont Press, 2005. – 360 p.

37. Capelhart B. L.; Kennedy W. J.; Turner W. C. *Guide to Energy Management*. 9th ed. Fairmont Press, 2020. – 648 p.

38. de Almeida A.; et al. *Residential Refrigeration: Energy Efficiency and Policy*. *Energy and Buildings*. 2017. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.010. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.010> (дата звернення: 24.09.2025).

39. IEC TS 60034-30-2:2016. *Efficiency classes of VSD-rated AC motors (IE-код для SynRM та ін.)*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://standards.iteh.ai/> (дата звернення: 24.09.2025).

40. NREL. *Variable Frequency Drive Evaluation Protocol*. 2017. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.nrel.gov> (дата звернення: 24.09.2025).

41. U.S. DOE. *Adjustable Speed Drive Part-Load Efficiency (Motor Tip Sheet № 11)*. 2012. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.energy.gov> (дата звернення: 24.09.2025).

42. GRUNDFOS. *Pump Handbook (інженерний довідник)*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://api.grundfos.com> (дата звернення: 24.09.2025).

43. University of Connecticut / J. W. Bartok. *Selecting an Energy/Shade Screen System (Fact Sheet)*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.umass.edu> (дата звернення: 24.09.2025).

44. Sanford S. *Using Curtains to Reduce Greenhouse Heating and Cooling Costs*. 2011. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://farm-energy.extension.org> (дата звернення: 24.09.2025).

45. Taylor C. R. LED Lighting in Greenhouse Horticulture: Photosynthesis. PhD thesis. Wageningen University, 2022. – 169 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wur.nl> (дата звернения: 24.09.2025).
46. Rutgers University. LED Lighting in Greenhouses Helps, but Standards Are Needed. 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rutgers.edu> (дата звернения: 24.09.2025).
47. U.S. DOE SSL Program; USDA-ARS. Horticulture R&D Meeting (slides). 2022. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energy.gov> (дата звернения: 24.09.2025).
48. Resource Innovation Institute. Lighting Best Practices Guide. 2022. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://resourceinnovation.org> (дата звернения: 24.09.2025).
49. PNNL. Energy Savings and Peak Load Reduction Benefits from Demand Response – Refrigeration. 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://buildingretuning.pnnl.gov> (дата звернения: 24.09.2025).
50. Title 24 CASE Report. Supermarket Refrigeration. 2019. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://title24stakeholders.com> (дата звернения: 24.09.2025).
51. MN-ASHRAE / KE2 Therm. Commercial Refrigeration Temperature & Defrost Control. 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mnashrae.org> (дата звернения: 24.09.2025).
52. US EPA. Refrigeration Road Map. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.epa.gov> (дата звернения: 24.09.2025).
53. Better Buildings (DOE). Fan System Cheat Sheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov> (дата звернения: 24.09.2025).
54. NGMA. Curtain Systems (Greenhouse). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ngma.com> (дата звернения: 24.09.2025).

55. NILM Review. Non-intrusive Load Monitoring: A Review. 2019. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://grundfos.com> (дата звернення: 24.09.2025).
56. ABB. Power Factor Correction and Harmonic Filtering in Electrical Networks (Application Guide). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://library.e.abb.com> (дата звернення: 24.09.2025).
57. Siemens. Installation and Maintenance Instructions for Power Factor Correction (PFC) Capacitors. 2025. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 24.09.2025).
58. ABB. Film Capacitors – Power Factor Correction (Manual). 2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://search.abb.com> (дата звернення: 24.09.2025).
59. OAPEN. Greenhouse Horticulture (open book; системний огляд). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://library.oapen.org> (дата звернення: 24.09.2025).
60. Siemens. Power Quality Solution (детюнінг фільтрокомпенсувальних установок). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://assets.new.siemens.com> (дата звернення: 24.09.2025).
61. Eurovent Certification. Understanding SEER and SCOP. 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eurovent-certification.com> (дата звернення: 24.09.2025).
62. Ludvig Svensson. Screening Guide: Energy Saving (white paper/guide). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ludvigsvensson.com> (дата звернення: 24.09.2025).
63. Cornell / Rutgers (Mattson, Both). Greenhouse Lighting Fixtures. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.negreenhouse.org> (дата звернення: 24.09.2025).
64. NV Energy. Variable Frequency Drives (Tech Sheet): стислий огляд енергозбереження вентиляторів/насосів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nvenergy.com> (дата звернення: 24.09.2025).

65. ABB. Low Voltage Capacitors. Power Factor Correction Solutions (брошура). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.gescan.com> (дата звернення: 24.09.2025).

66. Global Solar Atlas. Country Profile: Ukraine. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://globalsolaratlas.info> (дата звернення: 24.09.2025).

67. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). European Commission, JRC. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis_en (дата звернення: 24.09.2025).

68. PVsyst SA. Analysis of Electrical Shading Effects in PV Systems. Proc. EU PVSEC, 2021. – 8 p.

69. IEA-PVPS Task 13. Methods and Datasets for Analyzing Performance of Photovoltaic Systems. 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iea-pvps.org> (дата звернення: 24.09.2025).

70. Eum J.; Choi H.-J. Effects of Power Optimizer Application in a Building-Integrated PV System According to Shade Conditions. Buildings. 2024. Vol. 14, Issue 1, Article 53. DOI: 10.3390/buildings14010053. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/1/53> (дата звернення: 24.09.2025).

71. IEC 62116:2014. Utility-interconnected PV inverters – Test procedure of islanding prevention measures. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/en/publication/6479> (дата звернення: 24.09.2025).

72. FAO. BEFS RA – Biogas Community / Biogas Industrial : керівництва та користувачькі матеріали. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://openknowledge.fao.org> (дата звернення: 24.09.2025).

73. European Biogas Association (EBA). Statistical / Activity Reports 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.europeanbiogas.eu> (дата звернення: 24.09.2025).

74. IEA. Outlook for Biogas and Biomethane (2025). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org> (дата звернення: 24.09.2025).

75. NOAW. Best-practice Guidelines for Farms and Businesses on Manure to Energy. 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://noaw2020.eu> (дата звернення: 24.09.2025).

76. Palensky P.; Dietrich D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2011. Vol. 7, No. 3. pp. 381–388. DOI: 10.1109/TII.2011.2158841.

77. Elargoubi F. Z.; Chakir H. E.; El Khaili M.; Karim C.; Et-taoussi M.; Mricha R. Advancements in Home Energy Management Systems: A Review of Energy Optimization Strategies and Algorithmic Approaches. IFAC-PapersOnLine. 2024. Vol. 58, No. 13. pp. 545–551. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.539.

78. Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 2nd ed. Hoboken : Wiley-IEEE, 2013. – 720 p.

79. Dugan R. C.; McGranaghan M. F.; Santoso S.; Beaty H. W. Electrical Power Systems Quality. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2012. – 580 p.

80. IEA-PVPS Task 13. Managing PV Shading and Mismatch (materials & datasets). 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iea-pvps.org> (дата звернення: 24.09.2025).

81. Eum J.; Choi H.-J. Module-Level Power Electronics in BIPV: Effects on Yield. Buildings. 2024. Vol. 14, Issue 1, Article 53. DOI: 10.3390/buildings14010053. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/1/53> (дата звернення: 24.09.2025).

82. NREL; EPA. ENERGY STAR SHEMS – Modeling Savings (Tech. Report). 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/79534.pdf> (дата звернення: 24.09.2025).

83. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (офіційні джерела – Мінрегіон, zakon.rada.gov.ua). (дата звернення: 24.09.2025).

84. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 24.09.2025).

85. ДСТУ EN IEC 61730-1:2018. Фотоелектричні модулі. Вимоги безпеки. Частина 1. Вимоги до конструкції. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://online.budstandart.com> (дата звернення: 24.09.2025).

86. Кодекс цивільного захисту України від 02 жовтня 2012 р. № 5403-VI (чинна редакція). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 24.09.2025).

87. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua>(дата звернення: 24.09.2025).