

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ NET METERING У ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ ЗАПОРІЗЬКОЇ ОБЛАСТІ

Отримано 03 жов. 2025 р.; рекомендовано до публікації 23 бер. 2026 р.
Доступно онлайн 31 бер. 2026 р

Гулевський В. Б.¹, Постол Ю. О.²,
Белік Мілан³, Рубаненко О. О.⁴

Автор для кореспонденції: Гулевський Вадим,
e-mail: vadym.hulevskiy@tsatu.edu.ua

¹ канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-1434-9724>

² канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-0749-3771>

³ PhD
<https://orcid.org/0000-0002-9907-5365>

⁴ д-р. техн. наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>

^{1,2} Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного,
м. Запоріжжя, Україна

^{3,4} Університет західної Богемії, Пльзень,
Чеська Республіка

⁴ Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна;
Вінницький національний технічний
університет, м. Вінниця, Україна

Анотація. У статті досліджено можливості застосування принципу net metering у тепличному господарстві Запорізької області як ефективного інструменту управління енергоспоживанням. Експеримент проведено на базі теплиці площею 1000 м², обладнаної сонячною електростанцією. У межах дослідження здійснено систематичний моніторинг енергетичних параметрів протягом весняно-літнього циклу вирощування томатів сорту «Ріо Гранде» (березень – серпень 2025 року). Особливу увагу приділено оцінці впливу впровадження двостороннього обліку електроенергії на загальне енергоспоживання, економічну ефективність тепличного комплексу та стабільність агрокліматичних умов. Застосування механізму net metering дало змогу досягти зниження витрат на електроенергію на 52 %, отримати компенсацію за передану в мережу енергію, а також забезпечити стабільний мікроклімат, що сприяло підвищенню врожайності на 12 %. Результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції фотоелектричних систем у тепличне виробництво, особливо в регіонах з високим рівнем інсоляції. Запропонований підхід сприяє формуванню енергоефективної моделі аграрного господарства, знижує залежність від зовнішніх джерел живлення та підвищує екологічну сталість виробництва.

Ключові слова: сонячна енергетика, тепличне господарство, net metering, енергоефективність, аграрний сектор.

Вступ. Сучасні глобальні тенденції, зокрема стрімке зростання чисельності населення, активна урбанізація та кліматичні зміни, формують нові виклики для аграрного сектору. Особливо це стосується забезпечення стабільного виробництва сільськогосподарської продукції в умовах нестабільного клімату та щораз більшого попиту. У цьому контексті тепличні комплекси набувають особливої значущості, оскільки дають змогу створити контрольоване середовище для вирощування культур незалежно від зовнішніх погодних умов [1].

Водночас розвиток тепличного господарства в Україні стикається з низкою економічних бар'єрів. Одним з ключових стримувальних чинників є постійне зростання тарифів на електро- та тепло енергію, а також загальні комунальні витрати. За даними галузевих досліджень, витрати на енергоресурси можуть становити до 60 % у структурі собівартості тепличної продукції, що істотно знижує її рентабельність. У пошуках шляхів оптимізації витрат багато фермерів переміщують свої господарства до південних регіонів України, як-от Одеська, Херсонська та Запорізька області. Завдяки вищій середньо-

річній температурі та значній кількості сонячних днів у цих регіонах зменшуються витрати на обігрів і освітлення теплиць, що частково компенсує високі тарифи. З огляду на це особливої актуальності набуває впровадження технологічних рішень, спрямованих на зниження енергетичного навантаження без шкоди для агротехнічних параметрів. Одним з перспективних напрямів є використання сонячної енергетики, зокрема інтеграція фотоелектричних панелей у конструкцію теплиць. Це дає змогу частково або повністю покривати потреби в електроенергії, підвищити автономність об'єктів, знизити собівартість продукції та зменшити залежність від зовнішніх постачальників.

Сучасні дослідження підтверджують високий потенціал використання сонячної енергетики в тепличному господарстві як інструменту підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат [2]. Зокрема, зазначається, що поєднання сільськогосподарського виробництва з генерацією електроенергії дає змогу одночасно вирощувати продукцію та виробляти енергію, оптимізуючи використання земельних ресурсів [3]. У

дослідженні, проведеному в Кенії [4], встановлено, що вирощування капусти під сонячними панелями сприяє збільшенню врожайності на 30 % порівняно з контрольними ділянками, що свідчить про позитивний вплив часткового затінення на деякі культури. Європейський консорціум *REGACE* [5], реалізує масштабний проєкт з тестування прозорих фотоелектричних панелей у теплицях. Система *TriSolar* уможливіє регулювання кута нахилу панелей, забезпечуючи оптимальне освітлення рослин й ефективну генерацію енергії [6, 7]. У Франції прийнято законодавчі зміни, які спрощують регулювання агровольтаїчних проєктів, а в Нідерландах фермери інвестують у підвищені конструкції для сонячних панелей, що дають нагоду вирощувати культури під ними без втрати продуктивності [8].

Хоча потенціал використання сонячної енергетики в тепличному господарстві України ще обмежений, уже існують окремі приклади її успішного застосування. У роботі [9] досліджено можливості забезпечення локального споживача електроенергією з відновлюваних джерел для зменшення залежності від централізованого постачання. Особливістю задачі є вплив випадкової природи відновлюваної енергетики та споживання на можливості забезпечення енергетичного балансу в локальній енергосистемі, що потребує вибору складу та потужностей відновлюваної генерації й допоміжного обладнання. Такий підхід є особливо актуальним в умовах постійного зростання тарифів на електро- та теплоенергію, а також загального підвищення витрат на енергоносії.

Зокрема, у Дніпропетровській області реалізовано проєкти, де сонячні електростанції забезпечують енергопотреби холодильних комплексів та теплиць, що сприяє зниженню витрат на електроенергію до 40 % у весняно-літній період [10]. У південних регіонах країни малі господарства впроваджують модульні фотоелектричні системи потужністю 10–30 кВт, які забезпечують автономну роботу систем поливу та вентиляції [11]. Наприклад, у 2022 році компанія *ETL Group* реалізувала проєкт сонячної електростанції потужністю 680 кВт-год, розміщеної на даху складських приміщень з холодильними камерами для зберігання овочів та фруктів. Електроенергія використовується тільки для власних потреб підприємства, включаючи живлення систем охолодження, освітлення та вентиляції. За попередніми розрахунками, термін окупності проєкту становить 4-5 років, що свідчить про його фінансову життєздатність. У межах агропромислового кластера в Дніпропетровській області було встановлено сонячну електростанцію потужністю 10 МВт-год, яка частково забезпечує енергопотреби тепличного господарства. Станція використовується для живлення систем крапельного зрошення, автоматичного керування мікрокліматом та освітлення. Це дало підприємству нагоду зменшити витрати на електроенергію на понад 40 % у весняно-літній період [12].

У південних регіонах України, зокрема в Запорізькій та Херсонській областях, невеликі господарства почина-

ють впроваджувати модульні сонячні системи потужністю 10–30 кВт. Їх використовують для автономного живлення теплиць, особливо в сезон пікового навантаження. Такі рішення сприяють забезпеченню стабільної роботи систем поливу, вентиляції та освітлення без підключення до централізованої мережі.

Таким чином, міжнародний досвід і національні приклади демонструють високий потенціал використання сонячної енергетики як інструменту подвійного призначення – для виробництва продуктів харчування та електроенергії [13–16].

Оцінка доцільності застосування фотоелектричних систем у тепличному виробництві базується на трьох ключових кліматичних показниках: середньорічній температурі, кількості сонячних днів та рівні інсоляції [17–18]. Найсприятливішими умовами для впровадження сонячної енергетики вирізняються південні області України – Одеська, Херсонська та Запорізька. Тут середньорічна температура становить близько +10,5 °С, кількість сонячних днів перевищує 250, а рівень інсоляції сягає 1500–1600 кВт-год/м²/рік (рис. 1). Це дає змогу істотно знизити витрати на обігрів теплиць і забезпечити стабільну генерацію електроенергії протягом більшої частини року.

Центральні регіони (Київська, Черкаська, Полтавська області) мають помірний клімат із середньорічною температурою +8...+9 °С та інсоляцією на рівні 1200–1350 кВт-год/м²/рік. Кількість сонячних днів становить 200–220. У таких умовах сонячна енергетика може бути ефективною, однак у зимовий період виникає потреба в додаткових джерелах тепла.

Східні області (Харківська, Луганська, Донецька) демонструють схожі показники: температура +8...+9 °С, інсоляція – 1300–1450 кВт-год/м²/рік, кількість сонячних днів – 200–230. Це створює помірно сприятливі умови для використання фотоелектричних систем.

Практичне застосування сонячної енергетики супроводжується низкою викликів, зокрема добовою та сезонною нерівномірністю інсоляції. У нічний час генерація електроенергії припиняється, а в похмурі дні або взимку її ефективність істотно знижується. Це може негативно впливати на стабільність мікроклімату в теплиці.

Для подолання цих проблем доцільно впроваджувати такі технологічні рішення:

- Гібридні енергетичні системи, що поєднують сонячну генерацію з резервними джерелами (біогаз, централізоване електропостачання).
- Акумуляторні батареї високої ефективності, які накопичують надлишкову енергію для використання вночі.
- Системи енергоменеджменту, що оптимізують споживання енергії відповідно до її доступності.

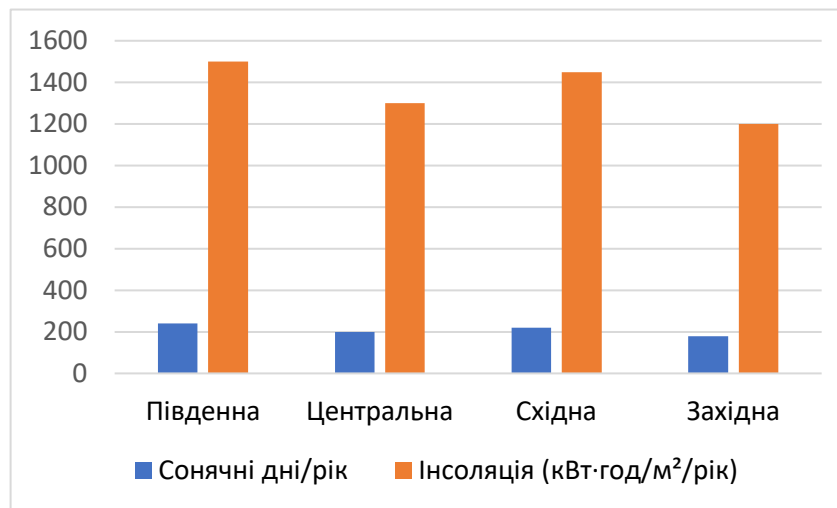


Рис. 1. Порівняння середньорічної температури, кількості сонячних днів та рівня інсоляції в аграрно активних регіонах України

Особливу увагу слід приділити накопиченню надлишкової електроенергії. У години пікової інсоляції фотоелектричні панелі можуть виробляти більше енергії, ніж споживає теплиця. Без ефективної системи зберігання ці надлишки або втрачаються, або передаються в електромережу, що не завжди економічно вигідно.

Одним із сучасних рішень є система компенсації надлишкової електроенергії – *net metering* [19, 20]. Вона дає агровиробникам можливість зараховувати вироблену енергію за тими самими тарифами, що й спожиту з мережі. Це забезпечує гнучке управління енергетичним балансом теплиці та знижує експлуатаційні витрати.

Механізм *net metering* працює так:

1. Фотоелектричні панелі генерують енергію вдень.
2. Енергія використовується для живлення систем теплиці.
3. Надлишок передається в електромережу.
4. У періоди низької генерації теплиця споживає енергію з мережі, оплачуючи лише різницю між виробленою та спожитою електроенергією.

У межах українського законодавства принцип *net metering* реалізується через положення про «зелений» тариф і підтримку локального виробництва електроенергії. Це особливо актуально для малих і середніх фермерських господарств, які прагнуть знизити витрати, забезпечити стабільність виробництва та підвищити екологічну ефективність.

Постановка завдання. Метою дослідження є оцінка ефективності використання сонячної електроенергії в тепличному господарстві Запорізької області та аналіз доцільності впровадження механізму *net metering*. Основні завдання:

- Визначити енергоспоживання ключових систем теплиці;

- Оцінити потенціал сонячної генерації;
- Проаналізувати вплив енергетичних параметрів на врожайність.

Виклад основного матеріалу. Запорізька область є одним з найперспективніших регіонів України для впровадження сонячної енергетики в аграрному секторі. Високий рівень інсоляції – до 2200–2400 годин на рік – у поєднанні з помірним кліматом (температура взимку – 5...+2 °С, влітку +25...+35 °С) створює сприятливі умови для використання сонячних панелей у тепличному господарстві.

У межах дослідження ефективності застосування принципу *net metering* в аграрному секторі було проведено експеримент на базі теплиці загальною площею 1000 м², розташованої в Запорізькій області. Теплиця обладнана сонячною електростанцією потужністю 30 кВт, яка забезпечувала часткове енергозабезпечення виробничого процесу. Як об'єкт вирощування вибрано теплолюбну культуру – томат сорту «Ріо Гранде», що потребує стабільного мікроклімату, зокрема високої освітленості та контрольованої температури.

Упродовж березня – серпня 2025 року було проведено систематичний моніторинг енергоспоживання тепличного комплексу, що охоплював повний весняно-літній цикл вирощування томатів – від посадки до збору врожаю. Такий вибір дозволив не лише оцінити реальні переваги впровадження фотоелектричних систем у тепличному господарстві, а й проаналізувати взаємозв'язок між енергетичними параметрами та агрономічною продуктивністю. Особливу увагу було приділено аналізу добових та сезонних коливань споживання енергії, ефективності використання фотоелектричних систем, а також впливу кліматичних умов на стабільність мікроклімату в теплиці.

Для збору даних було використано сучасне технічне оснащення:

- розумні лічильники електроенергії з функцією реального часу;
- інвертор з двостороннім обліком, що фіксує як споживання, так і генерацію електроенергії;
- чмарну платформу моніторингу, що забезпечувала дистанційний доступ до показників енергоспоживання, генерації, температури, вологості та освітленості.

Це дало змогу отримати достовірні дані для аналізу ефективності впровадження механізму *net metering*. У процесі дослідження здійснювався облік таких параметрів:

- загальне споживання електроенергії (кВт·год/день);
- генерація сонячної енергії (кВт·год/день);
- обсяг переданої енергії в мережу;
- пікові навантаження (ранкові та вечірні періоди);
- витрати на електроенергію до та після впровадження *net metering*.

Методологічна основа дослідження базується на комплексному підході до оцінки енергоспоживання

основних систем теплиці, зокрема: освітлення ($Q_{осв}$), обігріву ($Q_{опал}$), вентиляції ($Q_{вент}$), поливу ($Q_{полів}$) та втрат у системі ($Q_{втрати}$) [21]. Енергетичний баланс теплиці описується рівнянням:

$$Q_{заг} = Q_{осв} + Q_{вент} + Q_{полів} + Q_{опал} + Q_{втрати} \quad (1)$$

Генерація сонячної електроенергії визначається за формулою:

$$G = A \cdot \eta \cdot I \quad (2)$$

де G – добова генерація (кВт·год), A – площа сонячних панелей (m^2), η – ефективність панелей (0,20), I – добова інсоляція (кВт·год/ m^2).

Аналіз структури енергоспоживання показав, що найбільшу частку становить освітлення – 40 %, що зумовлено потребою в тривалому фотоперіоді для вирощування томатів. Вентиляція споживає 31,2 % енергії, забезпечуючи регуляцію температури та вологості. Обігрів становить 28,8 %, переважно актуальний у весняні місяці (рис. 2).

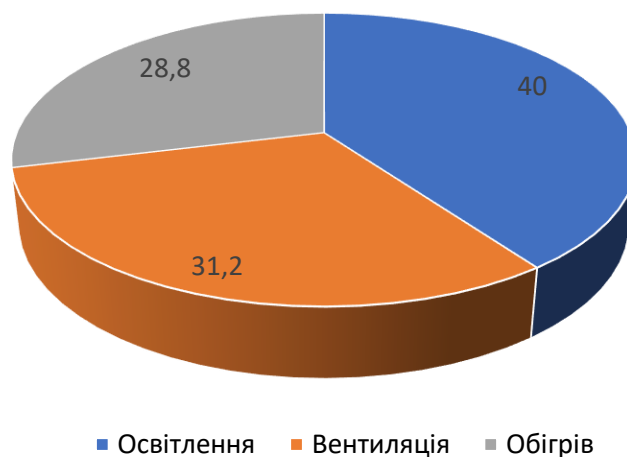


Рис. 2. Структура енергоспоживання теплиці

Протягом періоду дослідження параметри мікроклімату залишалися стабільними: температура – +22...+26 °C, вологість – 60–70 %, освітленість – 12–14 год/день. Ці умови є оптимальними для вирощування теплолюбних культур, зокрема томатів. Порівняння врожайності до та після впровадження сонячної генерації показало позитивну динаміку: до впровадження – 8,2 т/га, після впровадження – 9,2 т/га. Зростання – 12 %.

У процесі дослідження було зафіксовано загальне споживання електроенергії тепличним комплексом на рівні 21 500 кВт·год. Встановлена сонячна електростанція потужністю 30 кВт забезпечила генерацію 13 800 кВт·год, з яких 3200 кВт·год було передано до загальної електромережі за принципом *net metering*. Це дало змогу отримати компенсацію в розмірі 11 200 грн та знизити витрати на електроенергію на 52 % порівняно з аналогічним періодом попереднього року.

Порівняльний аналіз місячного споживання електроенергії в теплиці за період березень – серпень 2025 року показав (рис. 3), що споживання щомісяця зменшувалося. Це було зумовлено зниженням потреби в обігріві та штучному освітленні в тепліші місяці, що дало змогу суттєво оптимізувати енергетичні витрати.

Генерація сонячної енергії поступово зростала з березня до червня, досягаючи піка в літній період, після чого спостерігалось незначне зниження. Така динаміка відповідає сезонному збільшенню тривалості світлового дня та інтенсивності сонячного випромінювання. Хоча генерація демонструвала позитивну тенденцію, вона не перевищувала рівень споживання.

Найменший розрив між виробленою та спожитою енергією спостерігався у липні та серпні, що свідчить про високу ефективність роботи системи *net metering* саме в літній період, коли інсоляція досягає пікових значень.

Отримані результати підтверджують доцільність використання фотоелектричних систем у тепличному господарстві, особливо в регіонах з високим рівнем сонячної активності.

Впровадження механізму net metering сприяє не лише оптимізації витрат на електроенергію, а й підтримці сталості енергозабезпечення в умовах сезонних коливань генерації.

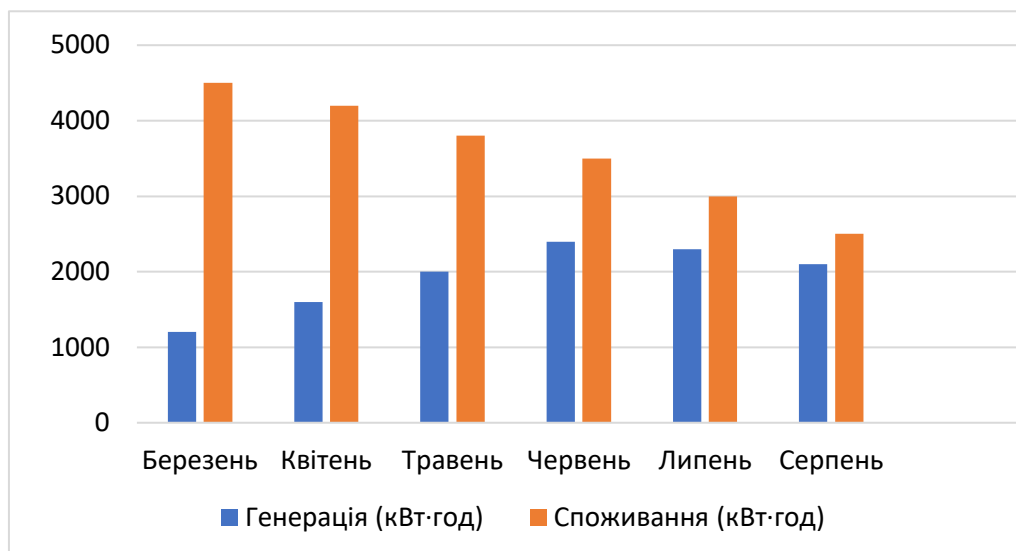


Рис. 3. Порівняння споживання та генерації сонячної енергії в теплиці

Для оцінки взаємозв'язків між енергетичними та агрономічними показниками було проведено кореляційний аналіз за період березень – серпень 2025 року. Дані свідчать про наявність сильних позитивних зв'язків:

- генерація сонячної енергії ↔ врожайність: $r = 0,96$ – дуже сильний позитивний зв'язок;
- освітленість ↔ врожайність: $r = 0,93$ – сильний позитивний зв'язок;
- температурна стабільність ↔ врожайність: $r = \text{мінус } 0,81$ – негативний зв'язок з коливаннями температури.

Це підтверджує, що стабільне енергозабезпечення та контроль мікроклімату мають прямий вплив на продуктивність тепличного господарства.

Висновки. Результати дослідження підтверджують, що впровадження *net metering* у тепличному господарстві є економічно доцільним. Зокрема, спостерігається значне зниження витрат на електроенергію – на 52 % у порівнянні з аналогічним періодом попереднього року. Завдяки механізму *net metering* теплиця отримала компенсацію за передану в мережу електроенергію в розмірі 11 200 грн, що дало змогу оптимізувати енергетичний баланс. Крім економічного ефекту, було зафіксовано покращення агрономічних показників: врожайність томатів зросла на 12 % – з 8,2 т/га до 9,2 т/га. Це свідчить про позитивний вплив стабільного енергозабезпечення та контрольованого мікроклімату на продуктивність тепличного господарства. Отже, впровадження фотоелектричної системи є не лише енергоефективним, а й стратегічно доцільним рішенням для сталого розвитку аграрного виробництва.

ПОСИЛАННЯ

- Hulevskiy V., Stopin Y., Postol Y., Dudina M. Experimental Study of Positive Influence on Growth of Seeds of Electric Field a High Voltage. In: Nadykto, V. (eds) Modern Development Paths of Agricultural Production. Springer, Cham., 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_36
- Hassanien, R. H., Li, M., & Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989–1001. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>
- Latifundist. (2023). Агровольтаїка: фінансова вигода, енергонезалежність та приклади використання у країнах світу. Retrieved from <https://latifundist.com/blog/read/3096-agrovoltayika-finansova-vigoda-energonezalezhnist-ta-prikladi-vikoristannya-u-krayinah-svitu>
- DSI Solar. (2022). Pushing agriculture and solar energy forward. Retrieved from <https://ua.dsisolar.com/info/pushing-agriculture-and-solar-energy-forward-92470734.html>
- REGACE Consortium. (2021). TriSolar system for greenhouse-integrated photovoltaics. Horizon Europe. Retrieved from <https://cordis.europa.eu/project/id/101000123>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Schindele, S. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

7. Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., & Schindele, S. (2021). Combining food and energy production: Design of agrophotovoltaic systems with dynamic shading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110785. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110785>
8. Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
9. Кузнецов, М. П., Лисенко О. (2023). ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЛАНСУ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНІЙ СИСТЕМІ З ВІДНОВЛЮВАНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ. *Відновлювана енергетика*, (1(72)), 6–18. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1\(72\).6-18](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72).6-18)
10. Agrigator. (2023, April 3). Міфи агровольтаїки: приклади з Дніпропетровщини. Retrieved from Agrigator.
11. Milan Belik, Vadym Hulevskiy, Yulia Postol, Olena Rubanenko. Ways to improve the efficiency of cleaning cutting fluids. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 2024.R. 100 NR 4. С. 83–86. <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/17484>
12. EastFruit. (2024, July). Solar farming instead of gas and coal: Agrivoltaics in Ukraine and worldwide. Retrieved from EastFruit article.
13. Багнюк, Н. В., Бортник, К. Я., Лавренчук С. В., Михальчук, М. А. (2025). Енергоефективна автономна система вентиляції теплиць з дистанційним інтелектуальним управлінням. *КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО*, (60), 260–268. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-28>
14. Ференц, В. І. (2023). ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ АГРОФОТОВОЛЬТАЇКИ. *Відновлювана енергетика*, (4(75)), 55–63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4\(75\).55-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75).55-63)
15. Бондаренко, Д. В., Матях, С. В., Суржик, Т. В., Шейко, І. О., Кравченко, М. В. (2024). ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ ЗА МАТЕРІАЛАМИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ». *Відновлювана енергетика*, (3(78)), 76–83. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
16. Raza, M. H., Nadarajah, M., & Ali, S. (2020). Agrovoltaic systems: Design, modeling, and performance analysis for sustainable food and energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110208>
17. Лопушанська, М. Р., Іванов, Є. А. (2022). Кліматичні чинники та їхня роль у розвитку сонячної енергетики у Львівській області. *Екологія і виробництво*, (6), 45–49. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.9>
18. Лапчинський, В. В., Лакуста, А. А., Хмелянчишин, Ю. В. (2024). Вплив кліматичних змін на агрономію: оцінка та заходи адаптації. *Таврійський науковий вісник: Агрономія*, (137), 62–70. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.60>
19. Darghouth, N. R., Wiser, R., & Barbose, G. (2011). The impact of rate design and net metering on the bill savings from distributed PV for residential customers. *Energy Policy*, 39(10), 5243–5253. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.040>
20. Brown, D. P., Sappington, D. E. M. (2017). Designing compensation for distributed solar generation: Is net metering ever optimal? *Energy Journal*, 38(3), 1–32. <https://doi.org/10.5547/01956574.38.3.dbro>
21. Гаєвський, О. Ю. (2023). Фотоенергетика. Частина I: Сонячна радіація і фотоелектричні модулі. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.

EFFECTIVENESS OF APPLYING THE NET METERING PRINCIPLE IN GREENHOUSE COMPLEXES OF THE ZAPORIZHZHIA REGION

Received Oct. 03, 2026; accepted Mar. 23, 2026
Available online Mar. 31, 2026

**Hulevskiy V.¹, Postol Y.², Belik Milan³,
Rubanenko O.⁴**

Author for correspondence: Hulevskiy Vadym,
e-mail: vadym.hulevskiy@tsatu.edu.ua

Abstract. *This article examines the potential of applying the net metering principle in greenhouse farming in the Zaporizhzhia region as an effective tool for energy consumption management. The experiment was conducted in a 1000 m² greenhouse equipped with a solar power plant. The study involved systematic monitoring of energy parameters throughout the spring–summer tomato cultivation cycle (March–August 2025), focusing on the "Rio Grande" variety.*

Special attention was given to assessing the impact of implementing bidirectional electricity metering on overall energy consumption, economic efficiency, and agroclimatic stability of the greenhouse complex. The use of net metering led to a 52% reduction in electricity costs, financial compensation for energy transferred to the grid, and the maintenance of a stable microclimate, which contributed to a 12% increase in crop yield.

The results confirm the feasibility of integrating photovoltaic systems into greenhouse production, particularly in regions with high solar radiation. The proposed approach supports the development of an energy-efficient agricultural model, reduces dependence on external power sources, and enhances the environmental sustainability of farming operations.

Keywords: solar energy, greenhouse farming, net metering, energy efficiency, agricultural sector.

Introduction. Current global trends, including rapid population growth, rapid urbanization, and climate change, pose new challenges for the agricultural sector. This is especially true for ensuring stable agricultural production in an unstable climate and growing demand. In this context, greenhouse complexes are of particular importance, as they allow creating a controlled environment for growing crops regardless of external weather conditions [1].

At the same time, the development of greenhouse farming in Ukraine faces low economic barriers. One of the key restraining factors is the constant increase in electricity and heat tariffs, as well as general utility costs. According to industry research, energy costs can account for up to 60% of the cost structure of greenhouse production, which significantly reduces its profitability. In search of ways to optimize costs, many farmers are moving their farms to the southern regions of Ukraine - such as Odesa, Kherson and Zaporizhzhia regions. Due to the higher average annual temperature and a significant number of sunny days in these regions, the costs of heating and lighting greenhouses are reduced, which partially compensates for the high tariffs. In this regard, the implementation of technological solutions aimed at reducing the energy load without harming

¹ PhD, associate professor
<https://orcid.org/0000-0003-1434-9724>

² 2PhD, associate professor
<https://orcid.org/0000-0002-0749-3771>

³ PhD
<https://orcid.org/0000-0002-9907-5365>

⁴ Dr. of Science (Tech.), professor
<https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>

^{1, 2} Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University, Zaporizhzhia, Ukraine

^{3, 4} University of West, Bohemia, Pilsen, Czech Republic

⁴ Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

agrotechnical parameters is becoming particularly relevant. One of the promising areas is the use of solar energy, in particular the integration of photovoltaic panels into greenhouse structures. This allows you to partially or fully cover electricity needs, increase the autonomy of facilities, reduce the cost of production, and reduce dependence on external suppliers.

Modern research confirms the high potential of using solar energy in greenhouse farming as a tool for increasing energy efficiency and reducing operating costs [2]. In particular, it is noted that combining agricultural production with electricity generation allows for simultaneous cultivation of products and generation of energy, optimizing the use of land resources [3]. A study conducted in Kenya [4] found that growing cabbage under solar panels increased yields by 30% compared to control plots, indicating the positive effects of partial shading on some crops. The European consortium REGACE [5] is implementing a large-scale project to test transparent photovoltaic panels in greenhouses. The TriSolar system allows you to adjust the angle of the panels, ensuring optimal lighting for plants and efficient energy generation [6,7]. In France, legislative changes have been adopted to simplify the regulation of agrovoltic projects,

while in the Netherlands farmers are investing in elevated structures for solar panels, which enable crops to be grown beneath them without any loss of productivity [8].

Although the potential for using solar energy in greenhouse farming in Ukraine has not yet become widespread, there are already some examples of its successful application. In [9], the possibilities of providing local consumers with electricity from renewable sources to reduce dependence on centralized supply were investigated. A feature of the problem is the impact of the random nature of renewable energy and consumption on the ability to ensure energy balance in the local energy system, which requires the selection of the composition and capacity of renewable generation and auxiliary equipment. This approach is especially relevant in the context of constant growth in electricity and heat tariffs, as well as a general increase in energy costs.

In particular, several projects have been implemented in the Dnipropetrovsk region, where solar power plants supply the energy needs of refrigeration complexes and greenhouses, reducing electricity costs by up to 40% during the spring and summer period [10]. In the southern regions of Ukraine, small farms are adopting modular photovoltaic systems with capacities of 10–30 kW, which ensure autonomous operation of irrigation and ventilation systems [11]. For example, in 2022, ETL Group implemented a 680 kWh solar power plant on the roof of warehouses equipped with cold storage facilities for vegetables and fruits. The electricity generated is used exclusively for the enterprise's own needs, particularly for cooling, lighting, and ventilation systems. Preliminary calculations indicate a payback period of 4–5 years, confirming the project's financial viability. In the Dnipropetrovsk region, a 10 MWh solar power plant has also been installed in the agro-industrial cluster, partially meeting the energy needs of the greenhouse industry. The SPP powers drip irrigation systems, automatic microclimate control, and lighting, enabling the company to reduce electricity costs by more than 40% during the spring and summer period [12].

In the southern regions of Ukraine, particularly Zaporizhzhia and Kherson, small farms are beginning to adopt modular solar systems with capacities of 10–30 kW. These systems provide an autonomous power supply for greenhouses, especially during peak load periods. Such solutions ensure the stable operation of irrigation, ventilation, and lighting systems without reliance on a centralized grid. Both international experience and national case studies highlight the high potential of solar energy as a dual-purpose resource — supporting both food production and electricity generation [13–16].

In the southern regions of Ukraine, particularly in Zaporizhzhia and Kherson regions, small farms are starting to implement modular solar systems with a capacity of 10–30 kW. They are used to provide an autonomous power supply for greenhouses, especially during peak load seasons. Such solutions allow for the stable operation of irrigation, ventilation, and lighting systems without connection to a

centralized network. Thus, international experience and national cases demonstrate the high potential of using solar energy as a dual-purpose tool — for food and electricity production [13–16].

The feasibility of using photovoltaic systems in greenhouse production is evaluated based on three key climatic indicators: average annual temperature, number of sunny days, and level of insolation [17–18]. The most favorable conditions for the adoption of solar energy are observed in the southern regions of Ukraine — Odesa, Kherson, and Zaporizhzhia. In these areas, the average annual temperature is approximately +10.5 °C, the number of sunny days exceeds 250, and the level of insolation reaches 1,500–1,600 kWh/m²/year (Fig. 1). These factors enable a significant reduction in greenhouse heating costs and ensure stable electricity production throughout most of the year. The central regions (Kyiv, Cherkasy, Poltava) have a temperate climate, with an average annual temperature of +8 to +9 °C and insolation levels of 1,200–1,350 kWh/m²/year. The number of sunny days ranges from 200 to 220. Under such conditions, solar energy can be effective, although additional heat sources are required during the winter period. The eastern regions (Kharkiv, Luhansk, Donetsk) demonstrate similar indicators: average annual temperature of +8 to +9 °C, insolation levels of 1,300–1,450 kWh/m²/year, and 200–230 sunny days. These parameters create moderately favorable conditions for the use of photovoltaic systems.

The feasibility of using photovoltaic systems in greenhouse production is assessed based on three key climatic indicators: average annual temperature, number of sunny days, and level of insolation [17–18]. The most favorable conditions for the adoption of solar energy are found in the southern regions of Ukraine — Odesa, Kherson, and Zaporizhzhia. In these areas, the average annual temperature is approximately +10.5 °C, the number of sunny days exceeds 250, and the level of insolation reaches 1,500–1,600 kWh/m²/year (Fig. 1). These factors allow for a significant reduction in greenhouse heating costs and ensure stable electricity production throughout most of the year. The central regions (Kyiv, Cherkasy, Poltava) have a temperate climate, with an average annual temperature of +8 to +9 °C and insolation levels of 1,200–1,350 kWh/m²/year. The number of sunny days ranges from 200 to 220. Under such conditions, solar energy can be effective, although additional heat sources are required during the winter period.

The eastern regions (Kharkiv, Luhansk, Donetsk) demonstrate similar indicators: temperature +8...+9°C, insolation — 1,300–1,450 kWh/m²/year, sunny days — 200–230. This creates moderately favorable conditions for the use of photovoltaic systems.

The practical application of solar energy is accompanied by a number of difficulties, in particular, the daily and seasonal unevenness of insolation. At night, electricity generation stops, and on cloudy days or in winter, its efficiency is significantly reduced. This can negatively affect the stability of the microclimate in the greenhouse. To overcome these

problems, it is advisable to implement the following technological solutions:

- Hybrid energy systems that combine solar generation with backup sources (biogas, centralized electricity supply).
- High-efficiency batteries that store excess energy for use at night.
- Energy management systems that optimize energy consumption according to its availability.

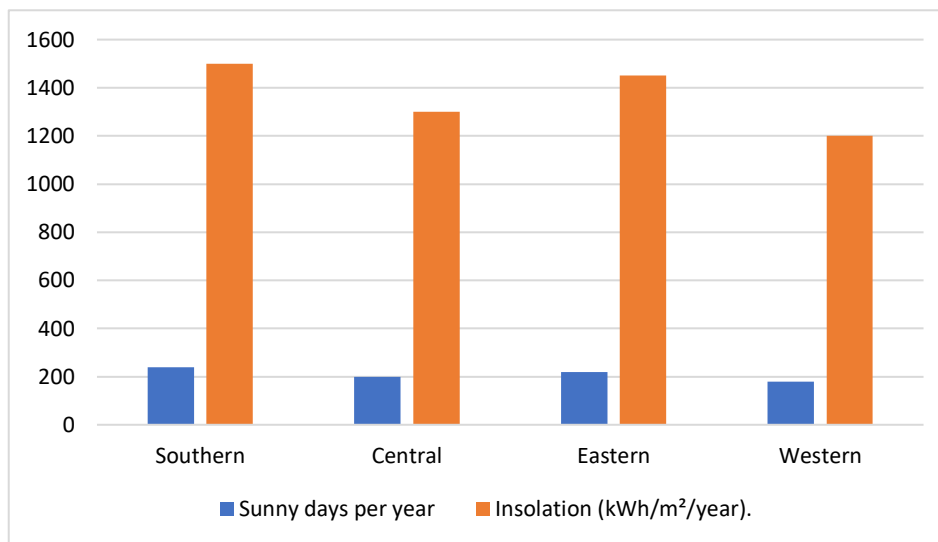


Fig. 1. Comparison of average annual temperature, number of sunny days, and insolation level in agriculturally active regions of Ukraine

Particular attention should be paid to the storage of excess electricity. During peak hours, photovoltaic panels can produce more energy than the greenhouse consumes. Without an effective storage system, this excess is either lost or transferred to the electricity grid, which is not always economically viable.

One of the modern solutions is the system of compensation of surplus electricity – *net metering* [19, 20]. It allows agricultural producers to charge the produced energy at the same rates as the energy consumed from the network. This provides flexible management of the energy balance of greenhouses and reduces operating costs.

1. The net metering mechanism works as follows:
2. Photovoltaic panels generate energy during the day.
3. The energy is used to power the greenhouse systems.
4. The surplus is transferred to the electricity grid.

During periods of low generation, the greenhouse consumes energy from the grid, paying only the difference between the electricity produced and consumed.

Within the framework of Ukrainian legislation, the principle of *net metering* is implemented through the provision of a “green tariff” and support for local electricity production. This is especially relevant for small and medium-sized farms that seek to reduce costs, ensure production stability, and increase environmental efficiency.

Problem statement. The purpose of this study is to evaluate the efficiency of using solar electricity in greenhouse farming in the Zaporizhzhia region and to analyze the feasibility of implementing a *net metering* mechanism.

Main tasks:

- Determine the energy consumption of key greenhouse systems;
- Assess the potential of solar generation;
- Analyze the impact of energy parameters on crop yield.

Main content. The Zaporizhzhia region is one of the most promising regions of Ukraine for the adoption of solar energy in the agricultural sector. A high level of insolation — up to 2,200–2,400 hours per year — combined with a temperate climate (–5 to +2 °C in winter, +25 to +35 °C in summer) creates favorable conditions for the use of solar panels in greenhouse farming.

As part of a study on the effectiveness of applying the net metering principle in the agricultural sector, an experiment was conducted in a greenhouse with a total area of 1,000 m², located in the Zaporizhzhia region. The greenhouse was equipped with a 30 kW solar power plant, which partially supplied energy for the production process. The selected crop was a thermophilic tomato variety, *Rio Grande*, which requires a stable microclimate with high light intensity and controlled temperature.

During March–August 2025, systematic monitoring of the energy consumption of the greenhouse complex was carried out, covering the entire spring-summer cycle of tomato cultivation - from planting to harvest. This choice allowed not only to assess the real benefits of implementing photovoltaic systems in greenhouse farming, but also to analyze the relationship between energy parameters and agroeconomic productivity. Particular attention was paid to the

analysis of daily and seasonal fluctuations in energy consumption, the efficiency of using photovoltaic systems, as well as the influence of climatic conditions on the stability of the microclimate in the greenhouse.

Modern technical equipment was used to collect data:

- Smart electricity meters with real-time functionality;
- A two-way inverter that records both consumption and generation of electricity;
- A cloud-based monitoring platform that provided remote access to energy consumption, generation, temperature, humidity, and lighting indicators.

This allowed the collection of reliable data to analyze the effectiveness of the net metering mechanism's implementation. The following parameters were taken into account during the study:

- Total electricity consumption (kWh/day);
- Solar energy generation (kWh/day);
- Amount of energy transmitted to the grid;
- Peak loads (morning and evening periods);
- Electricity costs before and after the implementation of net metering.

The methodological basis of the study is based on a comprehensive approach to assessing the energy consumption of the main greenhouse systems, in particular: lighting (Q_{light}), heating (Q_{heat}), ventilation (Q_{vent}), irrigation ($Q_{irrigation}$) and losses in the system (Q_{loss}) [21].

The energy balance of a greenhouse is described by the equation:

$$Q_{total} = Q_{light} + Q_{vent} + Q_{irrigation} + Q_{heat} + Q_{loss} \quad (1)$$

Solar electricity generation is determined by the formula:

$$G = A \cdot \eta \cdot I \quad (2)$$

where G is daily generation (kWh), A is the area of solar panels (m^2), η is the efficiency of the panels (0.20), I is daily insolation (kWh/m^2).

Analysis of the energy consumption structure showed that lighting accounts for the largest share at 40%, which is associated with the need for a long photoperiod for growing tomatoes. Ventilation consumes 31.2% of energy, ensuring temperature and humidity regulation. Heating accounts for 28.8%, which is mainly relevant in the spring months (Fig. 2). During the study period, the microclimate parameters remained stable: temperature ranged from +22 to +26 °C, humidity was maintained at 60–70%, and light exposure averaged 12–14 hours per day. These conditions are optimal for cultivating heat-loving crops, particularly tomatoes. A comparison of yields before and after the introduction of solar generation demonstrated positive dynamics: prior to implementation, yields were 8.2 t/ha, while after implementation they increased to 9.2 t/ha, reflecting a growth of 12%. Over the course of the study, the total electricity consumption of the greenhouse complex amounted to 21,500 kWh. The installed 30 kW solar power plant generated 13,800 kWh, of which 3,200 kWh was fed into the general electricity grid under the net metering principle. This enabled compensation of 11,200 UAH and reduced electricity costs by 52% compared to the same period in the previous year.

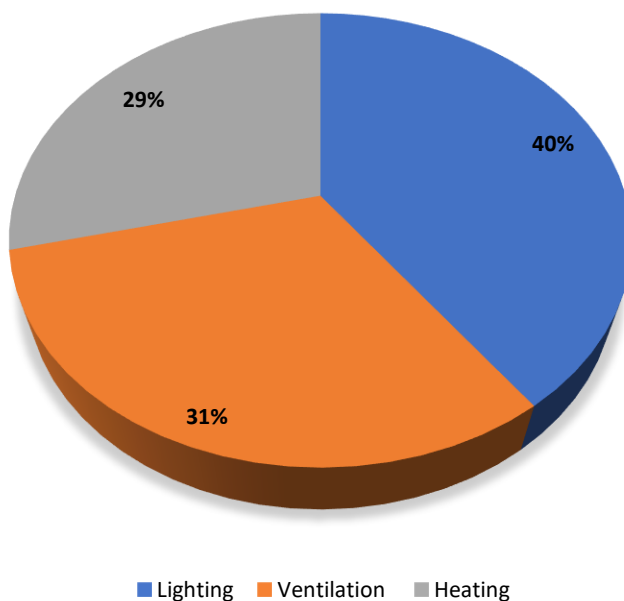


Fig. 2. Structure of Energy Consumption in the Greenhouse

A comparative analysis of monthly electricity consumption in the greenhouse during the period from March to August 2025 (Fig. 3) revealed a consistent decrease in consumption each

month. This decline was primarily due to reduced demand for heating and artificial lighting in the warmer months, which enabled significant optimization of energy costs.

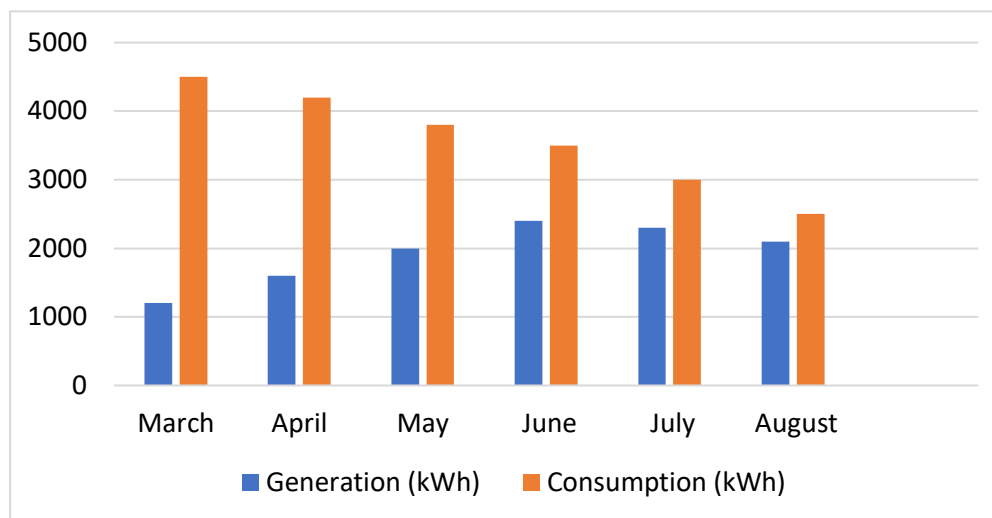


Fig. 3. Comparison of Energy Consumption and Solar Generation in the Greenhouse

Solar energy generation gradually increased from March to June, peaking in the summer, after which a slight decrease was observed. This dynamic corresponds to the seasonal increase in daylight hours and solar radiation intensity. Although generation showed a positive trend, it did not exceed the level of consumption.

The smallest gap between produced and consumed energy was observed in July and August, which indicates the high efficiency of the *net metering* system precisely in the summer period, when insolation reaches peak values. The results obtained confirm the feasibility of using photovoltaic systems in greenhouse farming, especially in regions with high solar activity. The implementation of the net metering mechanism allows not only to optimize electricity costs, but also to ensure the stability of energy supply in the face of seasonal fluctuations in generation. To evaluate the relationships between energy and agronomic indicators, a correlation analysis was conducted for the period March–August 2025. The results indicate the presence of strong positive correlations:

- Solar energy generation \leftrightarrow yield: $r = 0.96$ — very strong positive correlation;
- Illumination \leftrightarrow yield: $r = 0.93$ — strong positive correlation;
- Temperature stability \leftrightarrow yield: $r = -0.81$ — negative correlation with temperature fluctuations.

These findings confirm that a stable energy supply and effective microclimate control have a direct impact on greenhouse productivity.

Conclusions. The results of the study confirm that the implementation of net metering in greenhouse farming is economically viable. Electricity costs decreased significantly — by 52% compared to the same period of the previous year. Through net metering, the greenhouse received UAH 11,200 in compensation for electricity supplied to the grid, helping optimize the energy balance. Beyond the economic benefits, agronomic indicators also improved: tomato yield

increased by 12%, from 8.2 t/ha to 9.2 t/ha. This demonstrates the positive impact of a stable energy supply and controlled microclimate on greenhouse productivity. Therefore, the adoption of a photovoltaic system is not only energy-efficient but also a strategically sound solution for the sustainable development of agricultural production.

REFERENCES

1. V. Hulevskyi, Y. Stopin, Y. Postol, M. Dudina. Experimental Study of Positive Influence on Growth of Seeds of Electric Field a High Voltage. In: Nadykto, V. (eds) *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer, Cham., 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_36
2. Hassanien, R. H., Li, M., & Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989–1001. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>
3. Latifundist. (2023). Agrivoltaics: Financial benefits, energy independence, and examples of use in different countries. Retrieved from Latifundist agricultural blog
4. DSI Solar. (2022). Pushing agriculture and solar energy forward. Retrieved from <https://ua.dsisolar.com/info/pushing-agriculture-and-solar-energy-forward-92470734.html>
5. REGACE Consortium. (2021). TriSolar system for greenhouse-integrated photovoltaics. Horizon Europe. Retrieved from <https://cordis.europa.eu/project/id/101000123>
6. Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Schindele, S. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

7. Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., & Schindele, S. (2021). Combining food and energy production: Design of agrophotovoltaic systems with dynamic shading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110785. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110785>
8. Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
9. Kuznietsov, M., & Lysenko, O. (2023). ENSURING THE ENERGY BALANCE IN THE LOCAL SYSTEM WITH RENEWABLE GENERATION. *Vidnovluvana Energetika*, (1(72)), 6-18. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1\(72\).6-18](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72).6-18)
10. Agrigator. (2023, April 3). Myths of agrivoltaics: Examples from Dnipropetrovsk region. Retrieved from Agri-Gator agricultural news portal
11. Milan Belik, Vadym Hulevskiy, Yulia Postol, Olena Rubanenko. Ways to improve the efficiency of cleaning cutting fluids. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 2024.R. 100 NR 4. C. 83-86 <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/17484>
12. EastFruit. (2024, July). Solar farming instead of gas and coal: Agrivoltaics in Ukraine and worldwide. Retrieved from EastFruit article
13. Bahniuk, N., Bortnyk, K., Lavrenchuk, S., & Mykhalchuk M. (2025). Energy-efficient autonomous greenhouse ventilation system with remote intelligent control. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*, (60), 260-268. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-28>
14. Ferents, V. (2023). EFFICIENCY OF AGRO-PHOTOVOLTAICS USE. *Vidnovluvana Energetika*, (4(75)), 55-63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4\(75\).55-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75).55-63)
15. Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk T., Sheiko, I., & Kravchenko M. (2024). DEVELOPMENT TRENDS OF SOLAR POWER ENGINEERING BASED ON THE MATERIALS OF THE SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE «RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE 21. *Vidnovluvana Energetika*, (3(78)), 76-83. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
16. Raza, M. H., Nadarajah, M., & Ali, S. (2020). Agrovoltaic systems: Design, modeling, and performance analysis for sustainable food and energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110208>
17. Lopushanska, M. R., & Ivanov, Y. A. (2022). Climatic factors and their role in the development of solar energy in the Lviv region. *Ecology and Production*, (6), 45–49. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.9>
18. Lapchynskiy, V. V., Lakusta, A. A., & Khmelyanchyshyn, Yu. V. (2024). Impact of climate change on agronomy: Assessment and adaptation measures. *Tavriya Scientific Bulletin: Agronomy*, (137), 62–70. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.60>
19. Darghouth, N. R., Wisser, R., & Barbose, G. (2011). The impact of rate design and net metering on the bill savings from distributed PV for residential customers. *Energy Policy*, 39(10), 5243–5253. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.040>
20. Brown, D. P., Sappington, D. E. M. (2017). Designing compensation for distributed solar generation: Is net metering ever optimal? *Energy Journal*, 38(3), 1–32. <https://doi.org/10.5547/01956574.38.3.dbro>
21. Haievskiy, O. Y. (2023). Photoenergetics. Part I: Solar radiation and photovoltaic modules. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved from KPI institutional repository