

МАЛОМАСШТАБНА АГРОФОТОВОЛЬТАІКА ДЛЯ ДОМОГОСПОДАРСТВ: СТАРТОВИЙ МОДУЛЬ 100 М² ТА ПОТЕНЦІАЛ МАСШТАБУВАННЯ ДО МАЛОГО БІЗНЕСУ

Отримано 07 бер. 2026 р.; рекомендовано до публікації 26 чер. 2026 р.
Доступно онлайн 30 чер. 2026 р.

Зур'ян О. В.¹, Новицький С. В.²

Автор для кореспонденції: Зур'ян Олексій,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ д-р. техн. наук

<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

² аспірант

<https://orcid.org/0009-0005-5647-6635>

^{1,2} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У роботі розроблено концептуальну модель маломасштабного агрофотовольтаїчного модуля для домогосподарства в умовах піщаних ґрунтів Київської області з оцінкою можливості його поетапного масштабування. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення енергетичної автономності домогосподарств та адаптації агровиробництва до умов щораз вищої посушливості. Метою роботи є формування техніко-економічної моделі стартового агрофотовольтаїчного модуля площею 100 м² та розроблення формалізованого порогового критерію прийняття рішення щодо його впровадження з урахуванням перспектив переходу до малого бізнесу.

На основі аналізу питомої енергогенерації фотоелектричних систем та можливого зниження врожайності в разі часткового затінення запропоновано співвідношення, що пов'язує річний енергетичний ефект із втратами аграрної продукції. Показано, що за частки покриття 35–40 % та помірного зниження врожайності енергетичний ефект зазвичай перевищує аграрні втрати, що забезпечує економічну доцільність стартового модуля для домогосподарства.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні порогової моделі прийняття рішення для маломасштабної агрофотовольтаїчної системи та розробленні поетапної схеми масштабування від автономного домогосподарства до малого енергетично-аграрного бізнесу з урахуванням економічних, регуляторних і агротехнічних факторів невизначеності. На відміну від наявних досліджень, орієнтованих переважно на великі аграрні проекти, запропоновано структуровану модель старту малого проекту з мінімізацією ризиків.

Отримані результати свідчать про доцільність використання агрофотовольтаїки як інструменту стратегічного розвитку малих господарств. Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальну валідацію моделі, уточнення параметрів мікрокліматичного впливу та поглиблений аналіз економічної ефективності масштабованих конфігурацій.

Ключові слова: відновлювана енергетика, агрофотовольтаїка, напівпрозорі сонячні модулі, водна ефективність, піщані ґрунти, малі господарства.

Перелік використаних позначень та скорочень

АФВ – агрофотовольтаїчна система

СЕС – сонячна електростанція

PV – фотоелектрична система (англ. Photovoltaic system)

PAR – фотосинтетично активна радіація (англ.

Photosynthetically Active Radiation)

STC – стандартні умови випробувань (англ. Standard Test Conditions)

P_{inst} – встановлена потужність фотоелектричної системи, кВт

P_{inst, scale} – встановлена потужність масштабованої системи, кВт

A_{cov} – площа покриття фотоелектричними модулями, м²

p_A – питома встановлена потужність модуля на одиницю площі, Вт/м²

EPV – річний виробіток електроенергії, кВт·год

EPV, scale – річний виробіток електроенергії для масштабованої системи, кВт·год

Y_{spec} – питомий річний виробіток, кВт·год/кВт

Y – базова врожайність, кг

ΔY – зниження врожайності, кг

C_{el} – вартість електроенергії, грн/кВт·год

C_{crop} – вартість сільськогосподарської продукції, грн/кг

B_{el} – річний енергетичний економічний ефект, грн

L_{crop} – втрати доходу від зниження врожайності, грн

Stot – загальні інвестиційні витрати, грн

C_{unit} – питомі капітальні витрати на одиницю встановленої потужності, грн/кВт

Вступ. В умовах зростання вартості електроенергії, підвищення кліматичних ризиків та нестабільності енергопостачання питання енергонезалежності домогосподарств набуває стратегічного значення. Для власників присадибних ділянок і малих господарств Київської області ця проблема поєднується з іншою – дефіцитом вологи на легких піщаних ґрунтах, що особливо проявляється в літній період. Отже, домогосподарство одночасно стикається з двома викликами: необхідністю забезпечення стабільного енергопостачання та підтримання врожайності в умовах водного стресу.

Агрофотовольтаїка, яка передбачає поєднання виробництва електроенергії та вирощування сільськогосподарських культур на одній площі, розглядається як перспективний напрям інтеграції енергетики та аграрного сектору. Проте більшість досліджень присвячено великим фермерським або промисловим проектам, тоді як питання впровадження маломасштабних систем для домогосподарств залишаються недостатньо опрацьованими. Відсутня чітка модель старту невеликого агрофотовольтаїчного проекту, яка давала б змогу оцінити його доцільність на рівні 100 м² та визначити перспективи подальшого масштабування.

Для власника домогосподарства критичним є розуміння не лише технічної можливості встановлення сонячних модулів над ділянкою, а й економічного балансу між потенційними втратами врожайності та вигодами від виробництва електроенергії. Водночас саме невеликий пілотний модуль може слугувати інструментом зниження ризиків і поетапного переходу до малого агроенергетичного бізнесу.

З огляду на це актуальним є розроблення моделі стартового агрофотовольтаїчного модуля площею 100 м² для умов піщаних ґрунтів Київської області з подальшим аналізом можливостей масштабування. Такий підхід дає змогу поєднати задачі енергетичної автономності домогосподарства з довгостроковою стратегією розвитку малого бізнесу на основі інтегрованого використання земельної площі.

Постановка завдання

Метою роботи є розроблення та обґрунтування практичної моделі запуску маломасштабного агрофотовольтаїчного проекту для домогосподарства на прикладі стартового модуля площею 100 м² в умовах піщаних ґрунтів Київської області з оцінкою потенціалу його подальшого масштабування до рівня малого бізнесу.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- сформулювати технічну конфігурацію стартового агрофотовольтаїчного модуля, орієнтованого на забезпечення часткової енергетичної автономності домогосподарства;
- оцінити баланс між можливими втратами врожайності та вигодами від виробництва електроенергії;

- запропонувати пороговий критерій прийняття рішення щодо доцільності впровадження системи на рівні домогосподарства;

- проаналізувати сценарії масштабування від пілотної площі 100 м² до напівкомерційного та малого бізнес-рівня;

- визначити умови, за яких агрофотовольтаїчний проект переходить від інструменту енергонезалежності до економічно обґрунтованої підприємницької діяльності.

Таким чином, у роботі поєднується технічний, економічний та стратегічний підхід до впровадження агрофотовольтаїки на рівні малого господарства. Зазначений підхід дає змогу поєднати аналітичну глибину з прикладним інструментарієм, що може бути корисним як для дослідників, так і для практиків.

Огляд літератури

Питання інтеграції фотоелектричних систем із сільськогосподарським виробництвом активно вивчається з початку 2010-х років. Одні з перших концептуальних підходів до поєднання виробництва електроенергії та вирощування культур були сформульовані в роботах [1], де обґрунтовано можливість подвійного використання земельних ресурсів. Подальший розвиток концепції агрофотовольтаїки представлено в дослідженні [2], у якому автори запропонували моделі оптимізації просторового розміщення фотоелектричних модулів з урахуванням агротехнічних параметрів. У роботі [3] продемонстровано позитивний вплив агрофотовольтаїчних систем на водний баланс у посушливих регіонах, зокрема зменшення евапотранспірації та підвищення водної ефективності. Дослідження [4] підтверджує, що мікроклімат під модулями може сприяти стабілізації продуктивності культур в умовах високих температур. Аналогічні результати щодо впливу часткового затінення на ріст і розвиток рослин наведені в [5], де детально проаналізовано зміни мікрометеорологічних параметрів. Окремий напрям досліджень присвячений використанню напівпрозорих та спектрально-селективних модулів. У роботі [6] показано, що оптимізація спектрального складу пропущеної радіації сприяє зменшенню негативного впливу затінення на фотосинтез. У критичному огляді [7] систематизовано підходи до проектування агрофотовольтаїчних систем та підкреслено необхідність адаптації параметрів конструкції до конкретних культур і кліматичних умов. Водночас більшість наявних досліджень орієнтована на великомасштабні фермерські або промислові проекти. У роботі [8] наголошується на важливості економічної оцінки інтегрованих систем а в роботі [9] питання розглядається з позицій інтегральної продуктивності землекористування, однак старту малих проектів на рівні домогосподарств практично не приділено уваги. Аналіз сучасних тенденцій розвитку агрофотовольтаїки [10, 11] свідчить про зростання інтересу до децентралізованих енергетичних рішень, проте відсутні формалізовані моделі переходу від пілотної ділянки до масштабованого малого бізнесу. Отже, попри значну кількість досліджень,

проблема розроблення стартової моделі маломасштабного агрофотовольтаїчного проекту з оцінкою умов масштабування залишається недостатньо опрацьованою, що визначає актуальність даної роботи.

Виклад основного матеріалу

Стартовий агрофотовольтаїчний модуль площею 100 м² розглядається в роботі як мінімальна практично реалізована одиниця впровадження системи подвійного використання земельної ділянки на рівні домогосподарства. Такий масштаб дає змогу одночасно мінімізувати фінансові ризики та отримати репрезентативні показники для подальшого масштабування.

Для умов піщаних ґрунтів Київської області характерними є швидке висихання верхнього шару ґрунту, низька водозв'язувальна здатність та підвищена чутливість культур до перегріву в літній період. Згідно з результатами досліджень [3–5], часткове затінення під фотоелектричними модулями здатне зменшувати евапотранспірацію та стабілізувати мікроклімат у прикореневій зоні рослин. Саме ці передумови покладено в основу концепції стартового модуля.

Конструктивно модуль передбачає встановлення напівпрозорих або стандартних фотоелектричних панелей із часткою покриття 35–40 % від загальної площі. Тож фактична площа розміщення модулів становить 35–40 м². За питомої встановленої потужності 130–160 Вт/м² (характерної для частково прозорих або розріджених конструкцій) сумарна встановлена потужність системи оцінюється на рівні 4,5–6,0 кВт.

Сучасні мас-маркет PV-модулі з кремнієвими елементами мають ефективність до 24,5 %, що відповідає близько 170–180 Вт встановленої потужності на 1 м² площі панелі за стандартних умов випробувань. Напівпрозорі (spectrally selective) фотоелектричні технології, що поєднують генерацію електрики з пропусканням частини фотосинтетично активного випромінювання здебільшого демонструють нижчу питомість потужності через компроміс між прозорістю та перетворенням електроенергії [12].

Встановлена потужність визначається співвідношенням

$$P_{inst} = A_{cov} \cdot P_A,$$

де A_{cov} – площа покриття модулями, м²;

P_A – питома потужність модуля, Вт/м².

Для середніх кліматичних умов центральної України питомий річний виробіток фотоелектричних систем становить близько 1000–1100 кВт·год/рік [13]. Відповідно, очікуваний річний виробіток стартового модуля можна оцінити як

$$E_{PV} = P_{inst} \cdot Y_{spec},$$

де Y_{spec} – питомий виробіток (кВт·год/рік)

Для потужності 5 кВт це відповідає 5000–5500 кВт·год на рік. Такий обсяг генерації зіставний з річним споживанням електроенергії типового домогосподарства, що відкриває можливість часткової або повної енергетичної автономності.

З агрономічного погляду модуль орієнтований на вирощування культур, відносно стійких до помірного затінення, зокрема полуниці. Згідно з даними [5, 9], допустимий рівень зменшення фотосинтетично активної радіації без критичного падіння врожайності становить 20–40 % залежно від кліматичних умов і сорту. У роботі приймається, що в разі покриття 35–40 % можливе зниження врожайності у середньостатистичний рік не перевищує 15–20 %, що відповідає даним польових експериментів, наведених у [3, 4].

Водночас очікуване зменшення сезонного водоспоживання може досягати 20–30 %, що особливо важливо для піщаних ґрунтів. Економія води для площі 100 м² може становити 8–12 м³ за сезон, що узгоджується з результатами моделювання водного балансу в роботі [9].

З погляду домогосподарства стартовий модуль 100 м² виконує три функції:

- забезпечує базову генерацію електроенергії для власних потреб;
- зменшує водні ризики вирощування культури;
- створює експериментальну платформу для оцінки подальшого розширення.

Для наочності основні техніко-економічні параметри стартового модуля зведено в табл. 1.

Таблиця 1. Орієнтовні параметри стартового агрофотовольтаїчного модуля 100 м²

| № з/п | Показник | Значення |
|-------|------------------------|----------------------|
| 1 | Загальна площа | 100 м ² |
| 2 | Частка покриття | 35–40 % |
| 3 | Площа модулів | 35–40 м ² |
| 4 | Встановлена потужність | 4,5–6,0 кВт |
| 5 | Річний виробіток | 4500–5500 кВт·год |
| 6 | Зниження врожайності | 15–20 % |
| 7 | Економія води | 20–30 % |

Таким чином, стартовий модуль площею 100 м² розглядається як збалансована конфігурація, що поєднує прийнятний рівень аграрних втрат з суттєвим енергетичним ефектом. Його основна перевага полягає у можливості поетапного впровадження з мінімальними ризиками для домогосподарства та формуванні бази даних для подальшого масштабування.

Для домогосподарства рішення про встановлення агрофотовольтаїчної системи приймається не лише з позицій технічної можливості, а передусім на основі економічного балансу між вигодами від виробництва електроенергії та можливими втратами аграрної продукції. Тому доцільно сформулювати простий пороговий критерій, який дає змогу оцінити доцільність старту проєкту на площі 100 м².

Введемо умовний річний енергетичний дохід (або економію) від роботи фотоелектричної системи:

$$B_{el} = E_{PV} \cdot C_{el},$$

де E_{PV} – річний виробіток електроенергії, кВт·год,

C_{el} – середня вартість електроенергії для домогосподарства, грн/кВт·год

Можливі втрати від зменшення врожайності визначимо як

$$L_{crop} = \Delta Y \cdot C_{crop},$$

де ΔY – зменшення врожайності, кг;

C_{crop} – середня ціна реалізації продукції, грн/кг.

Порогова умова доцільності старту проєкту має вигляд:

$$E_{PV} \cdot C_{el} \succ \Delta Y \cdot C_{crop}.$$

Це співвідношення означає, що економія або дохід від електроенергії має перевищувати потенційні втрати від зниження врожайності.

Для стартового модуля 100 м² за умов Київської області можна прийняти такі орієнтовні параметри: річний виробіток – 4500–5500 кВт·год (за встановленої потужності близько 5 кВт), середнє річне споживання домогосподарства – 3000–4000 кВт·год [14], вартість електроенергії для населення – 4–5 грн/кВт·год. У такому разі річна економія становитиме:

$$B_{el} \approx 18000-27500 \text{ грн/рік.}$$

Якщо зниження врожайності становить 15–20 % за базового врожаю 110 кг, то втрати продукції становлять 16–22 кг. За ціни 80–120 грн/кг потенційні втрати дорівнюють:

$$L_{crop} \approx 1280-2640 \text{ грн/рік.}$$

Порівняння показує, що навіть за верхніх значень втрат продукції енергетичний ефект суттєво перевищує аграрні втрати. Отже, для домогосподарства з типовим споживанням електроенергії стартовий модуль є економічно обґрунтованим за умови помірного затінення.

Однак у разі значного зниження врожайності (понад 30 %) або низької вартості електроенергії порогова умова може не виконуватися. Тому ключовими факторами є рівень затінення, структура споживання електроенергії та ринкова ціна продукції.

Для узагальнення умов доцільності в табл. 2 наведено спрощену інтерпретацію порогових сценаріїв.

Таблиця 2. Порогові умови доцільності старту агрофотовольтаїчного модуля 100 м²

| Сценарій | Енергетичний ефект | Втрати врожаю | Рішення |
|----------------------------------|--------------------|---------------|----------------------|
| Помірне затінення (15–20 %) | Високий | Низькі | Доцільно |
| Сильне затінення (>30 %) | Середній | Високі | Потребує аналізу |
| Низьке споживання електроенергії | Низький | Низькі | Обмежена доцільність |
| Посушливий рік | Високий | Мінімальні | Доцільно |
| Помірне затінення (15–20 %) | Високий | Низькі | Доцільно |

Таким чином, запропонована порогова модель дає змогу домогосподарству оцінити доцільність впровадження агрофотовольтаїчної системи без складного фінансового моделювання. Її перевага полягає в простоті застосування та можливості адаптації до локальних умов, що створює основу для подальшого масштабування проєкту.

Модель масштабування агрофотовольтаїчного проєкту

Стартовий модуль площею 100 м² розглядається не лише як інструмент енергетичної автономності домогосподарства, а і як базова структурна одиниця для подальшого розширення. Масштабування агрофотовольтаїчної системи до площ 0,1 га та 0,5 га змінює не лише абсолютні показники генерації та виробництва продукції, але й економічну логіку функціонування проєкту.

У разі збереження частки покриття 35–40 % та аналогічних технічних характеристик можна припустити, що встановлена потужність зростає пропорційно площі [15]. Отже, для площі 0,1 га (1000 м²) потенційна встановлена потужність становитиме орієнтовно 45–60 кВт, а для 0,5 га (5000 м²) – 225–300 кВт. Відповідно, очікуваний річний виробіток електроенергії визначається співвідношенням

$$E_{PV, scale} = P_{inst, scale} \cdot Y_{spec}$$

де $P_{inst, scale}$ – встановлена потужність системи відповідного масштабу,

Y_{spec} – питомий річний виробіток, прийнятий на рівні 1000–1100 кВт·год/кВт.

Для напівкомерційного рівня (0,1 га) це відповідає 45–66 МВт·год на рік, а для 0,5 га – 225–330 МВт·год на рік.

Водночас аграрна складова також масштабується. За базової врожайності 1,0–1,2 кг/м² сумарний урожай на площі 0,1 га може становити близько 1–1,2 т продукції, а на 0,5 га – 5–6 т [16]. Навіть у разі зниження врожайності на 15–20 % аграрна складова зберігає суттєве економічне значення.

Принципова відмінність масштабування полягає у зміні структури витрат [17]. Якщо для стартового модуля частка витрат на інвертор, електротехнічне обладнання й монтаж є відносно високою в перерахунку на 1 м², то зі збільшенням площі спостерігається ефект масштабу: частка капітальних витрат на одиницю встановленої потужності зменшується. Подібні закономірності економії масштабу характерні для фотоелектричних систем загалом і описані у [2, 8].

Для наочності результати масштабування наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Орієнтовні параметри масштабування агрофотовольтаїчного проєкту

| Показник | 100 м ² | 0,1 га | 0,5 га |
|-------------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------|
| Встановлена потужність | ~5 кВт | 45–60 кВт | 225–300 кВт |
| Річний виробіток | 5–5,5 МВт·год | 45–66 МВт·год | 225–330 МВт·год |
| Урожайність (базова) | 0,1 т | 1–1,2 т | 5–6 т |
| Зниження врожайності (15–20%) | 0,016–0,022 т | 0,15–0,24 т | 0,75–1,2 т |
| Економічна логіка | Автономія | Часткова комерціалізація | Бізнес-модель |

Масштабування змінює характер проєкту. Якщо на рівні 100 м² система орієнтована на самозабезпечення електроенергією та зниження ризиків, то на рівні 0,1 га з'являється можливість реалізації надлишкової електроенергії або продукції. На площах близько 0,5 га

агрофотовольтаїка вже може розглядатися як повноцінний елемент малого бізнесу [18].

Однак важливо враховувати, що зі збільшенням площі зростають вимоги до регуляторного оформлення, підключення до мережі, фінансування та агротехнічного супроводу. Тому масштабування повинно здійснюватися поетапно – від пілотного модуля до напівкомерційного рівня з поступовим накопиченням емпіричних даних.

Отже, запропонована модель масштабування демонструє, що стартовий модуль площею 100 м² може виступати базовим елементом поступового розвитку проєкту, забезпечуючи зниження фінансових ризиків і формування досвіду перед переходом до комерційного рівня.

Проте запропоноване пропорційне масштабування не слід розглядати як повністю лінійний процес. Зі збільшенням площі агрофотовольтаїчної системи виникають додаткові фактори невизначеності, що можуть впливати як на технічні, так і на економічні показники проєкту, унаслідок чого інтегральний ефект може бути або позитивний, або негативний (рис. 1).

По-перше, економіка масштабу не є абсолютно пропорційною. Для стартового модуля 100 м² значну частку витрат становлять інвертор, система захисту, проєктування та монтаж. У разі збільшення площі до 0,1 га та більше спостерігається зменшення питомих капітальних витрат на 1 кВт встановленої потужності за рахунок ефективнішого використання обладнання та конструкцій. У спрощеному вигляді це може бути описано співвідношенням:

$$C_{unit} = \frac{C_{tot}}{P_{inst}}$$

де C_{unit} – питомі капітальні витрати на 1 кВт,

C_{tot} – загальні інвестиційні витрати,

P_{inst} – встановлена потужність.

Зі зростанням P_{inst} величина C_{unit} має тенденцію до зменшення, однак після певного порогу додаткові витрати на підключення до мережі, проєктні роботи та дозвільні процедури можуть частково нівелювати цей ефект [19].

По-друге, регуляторні обмеження можуть виступати бар'єром масштабування. Якщо для невеликої установки, орієнтованої на власне споживання, процедура підключення є відносно спрощеною, то в разі переходу до десятків або сотень кіловат виникає необхідність погодження технічних умов, можливого посилення мережі та зміни статусу суб'єкта господарювання. Це означає, що перехід від домогосподарства до малого бізнесу супроводжується не лише збільшенням потужності, а й зміною нормативного середовища.

По-третє, агрономічні ризики зростають зі збільшенням площі. Якщо на 100 м² забезпечити однорідність поливу та контроль мікроклімату відносно просто, то на площі 0,5 га з'являються фактори просторової неоднорідності

ґрунту, нерівномірності затінення та складності технологічного обслуговування [20]. Це може впливати на фактичний рівень зниження врожайності та вимагати адаптації агротехнічних заходів.

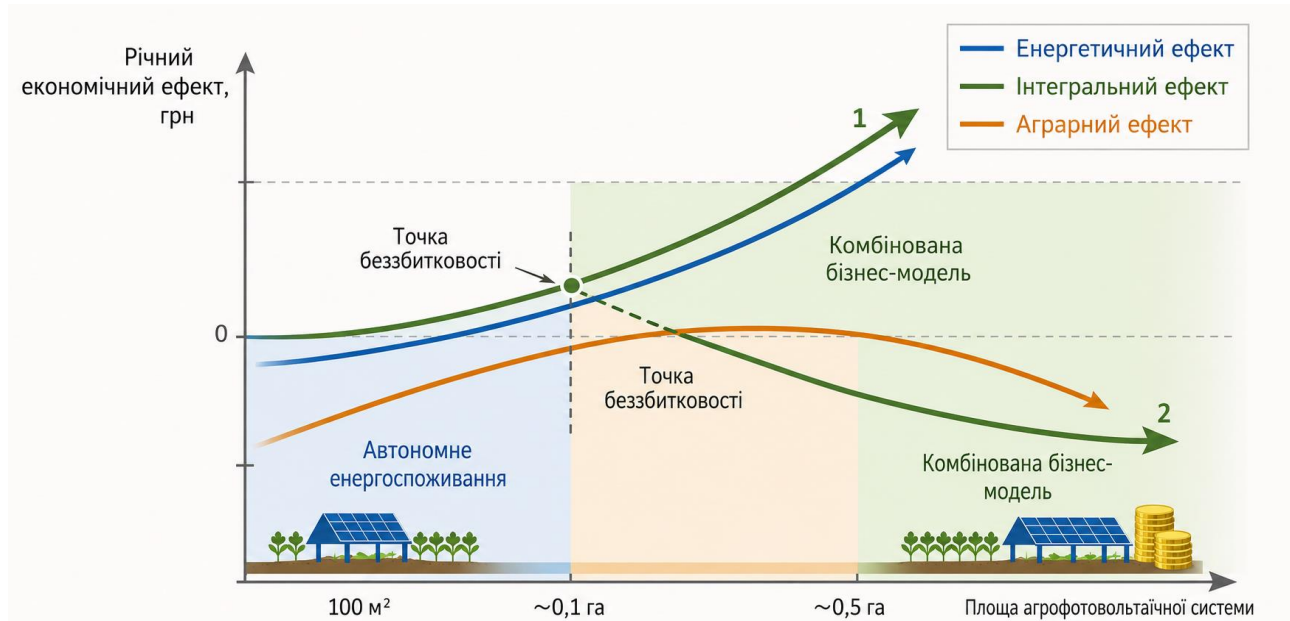


Рис. 1. Можливі траєкторія розвитку агрофотовольтаїчного проекту від стартового модуля до малого бізнесу з урахуванням фактора невизначеності

Таким чином, масштабування агрофотовольтаїчного проекту доцільно розглядати як поетапний процес з поступовим нарощуванням площі та аналізом фактичних результатів стартового модуля. Саме пілотна ділянка 100 м² виконує роль інструменту зниження невизначеності, даючи змогу емпірично уточнити параметри врожайності, водоспоживання та енергогенерації перед переходом до напівкомерційного рівня.

Запропонована модель стартового модуля площею 100 м² розглядається не як ізольоване технічне рішення, а як перший етап траєкторії розвитку агрофотовольтаїчного проекту. Стратегія розвитку передбачає поступовий перехід від забезпечення енергетичної автономності домогосподарства до формування економічно самодостатньої бізнес-моделі.

На першому етапі (пілотний рівень) агрофотовольтаїчна система виконує функцію зниження енергетичної залежності та водних ризиків. Основна мета — покриття власного споживання електроенергії та накопичення фактичних даних щодо врожайності, водоспоживання та стабільності роботи обладнання. Фінансовий ризик на цьому етапі є відносно обмеженим, оскільки навіть часткова генерація електроенергії забезпечує економію коштів домогосподарства.

На другому етапі (напівкомерційний рівень, близько 0,1 га) система починає генерувати надлишкову електроенергію або збільшується обсяг продукції для реалізації. Тут формується подвійний економічний ефект: дохід від

продажу сільськогосподарської продукції поєднується з потенційною реалізацією електроенергії або компенсацією власного споживання. Важливим стає аналіз ринку збуту продукції та умов підключення до електромережі.

На третьому етапі (масштаб близько 0,5 га) агрофотовольтаїчний проєкт може трансформуватися в малий бізнес з чіткою підприємницькою моделлю. У цьому разі ключову роль відіграють:

- стабільність аграрної продуктивності;
- прогнозованість енергетичного виробітку;
- оптимізація витрат на обслуговування;
- нормативне забезпечення комерційної діяльності.

Перехід між етапами доцільно здійснювати лише в разі виконання порогової умови економічної доцільності, сформульованої в попередньому розділі. Крім того, рішення про масштабування повинно ґрунтуватися на фактичних результатах експлуатації стартового модуля протягом принаймні одного вегетаційного циклу.

Схематично стратегія розвитку може бути представлена як послідовність трьох фаз (рис. 2). Особливістю запропонованого підходу є поєднання технічного й стратегічного планування. На відміну від великих централізованих агрофотовольтаїчних проєктів, де масштабування відбувається одразу на значних площах, модель для домогосподарства передбачає поступове нарощування потужності з одночасним зниженням ризиків.



Рис. 2. Етапи розвитку агрофотовольтаїчного проекту від домогосподарства до малого бізнесу

Таким чином, агрофотовольтаїка в контексті піщаних ґрунтів Київської області може розглядатися не лише як інструмент подвійного використання земельної площі, але і як механізм формування стійкої локальної енергетично-аграрної системи. Саме поетапність розвитку забезпечує можливість адаптації до кліматичних, економічних та регуляторних умов і створює основу для трансформації домогосподарства в малий енергетично-аграрний бізнес.

Висновок

1. У роботі запропоновано концепцію стартового агрофотовольтаїчного модуля площею 100 м² для умов піщаних ґрунтів Київської області, орієнтовану на забезпечення часткової або повної енергетичної автономності домогосподарства. Показано, що частка покриття 35–40 % здатна забезпечувати виробіток електроенергії системою на рівні, зіставному з річним споживанням типового домогосподарства.
2. Сформульовано порогову модель прийняття рішення щодо впровадження агрофотовольтаїчної системи, яка базується на співвідношенні між економією від виробництва електроенергії та втратами від можливого зниження врожайності. Запропонований критерій дає змогу оцінити доцільність проекту без складного фінансового моделювання й адаптується до локальних цінових умов.
3. Показано, що за умов помірного затінення (15–20 % зниження врожайності) енергетичний ефект у більшості сценаріїв суттєво перевищує аграрні втрати, що робить стартовий модуль економічно обґрунтованим для домогосподарства.

4. Розроблено модель поетапного масштабування від пілотної ділянки 100 м² до напівкомерційного (0,1 га) та малого бізнес-рівня (0,5 га). Встановлено, що масштабування супроводжується зміною економічної логіки проекту – від автономного енергоспоживання до комбінованої бізнес-моделі з подвійним доходом.
5. Виявлено, що масштабування не є лінійним процесом та пов'язане з економічними, регуляторними та агротехнічними ризиками. Зменшення питомих капітальних витрат при збільшенні площі може компенсувати частину додаткових витрат, однак потребує поетапного впровадження та аналізу фактичних результатів стартового модуля.
6. Запропонований підхід дає змогу розглядати агрофотовольтаїку не лише як технологічне рішення, а як інструмент стратегічного розвитку домогосподарства з потенційною трансформацією в малий енергетично-аграрний бізнес.

Рис 1 і рис. 2 були створені авторами з використанням інструментів штучного інтелекту на основі розробленої в дослідженні методики та отриманих результатів.

ПОСИЛАННЯ

1. Goetzberger A., Zastrow A. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*. 1982. Vol. 1. P. 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
2. Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard Y. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*. 2011. Vol. 36. P. 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
3. Barron-Gafford G. A., Pavao-Zuckerman M. A., Minor R. L. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*. 2019. Vol. 2. P. 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
4. Adeg E. H., Selker J. S., Higgins C. W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13(11). e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
5. Marrou H., Guilioni L., Dufour L., Dupraz C., Wery J. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013. Vol. 177. P. 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>
6. Toledo C., Scognamiglio A. Agrivoltaic systems design and assessment: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 148. 111295. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111295>
7. Weselek A., Ehmann A., Zikeli S., Lewandowski I., Schindele S., Högy P. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. *Agronomy for Sustainable Development*. 2019. Vol. 39. Article 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
8. Zurian O., Tolkunov, A., Omelchenko T. (2025). Risk considerations in the study of investment attractiveness of geothermal energy objects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(109), 97–103. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.13>
9. Valle B., Simonneau T., Sourd F., et al. Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy*. 2017. Vol. 206. P. 1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>
10. Elamri Y., Cheviron B., Lopez J. M., Dejean C., Belaud G. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuce. *Agricultural Water Management*. 2018. Vol. 208. P. 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.015>
11. Shafidah Shafian. Semitransparent Solar Cells for Agriculture Application. *Future Energy and Environment Letters* 3, Issue 1 (2025). 1–18. <https://doi.org/10.37934/feel.3.1.118>
12. Novytskyi S., Zurian O. Photoelectric converters. types, efficiency. *Visnyk of Kherson National Technical University*. No. 1(88) (2024). 92–102. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12>
13. Kudrya S. O. Renewable energy sources. Institute of Energy and Power Engineering of the NAS of Ukraine. Monograph. 511 p. https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vidnovliuvani_Djerela_Monography_2025.pdf
14. Matiakh S., Ausheva N., Kardashov O., Bondarenko D. (2025). Determination of the photovoltaic potential of territorial communities of Ukraine using geoinformation systems. *Vidnovluvana Energetika*. (4(83)). 165–188. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4\(83\).165-188](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4(83).165-188)
15. Surzhyk T. V. Scientific and Technical Principles for Improving the Energy and Techno-Economic Efficiency of Solar Radiation Energy Conversion Systems : Doctor of Technical Sciences Dissertation: Specialty 05.14.08. Conversion of Renewable Energy Sources. Kyiv : Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2021.
16. Havrysh V., Kalinichenko A., Szafranek E., Hruban V. Agricultural Land: Crop Production or Photovoltaic Power Plants. *Sustainability* 2022, 14, 5099. <https://doi.org/10.3390/su14095099>
17. Bondarenko D., Matyakh S., Surzhyk T., Shevchuk V. (2023). Energy unit kit for photovoltaic cluster. *Vidnovluvana Energetika*. (3(74)). 53–58. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).53-58](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).53-58)
18. 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)
19. Taylor M., McDonnell N., Davies P. et al. Scaling agrivoltaics: planning, legal, and market pathways to readiness. *Sustain Sci*. 20. 1499–1517 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11625-025-01668-w>
20. Pekk L., Varbanov P. S., Pan T., Weltsch Z., Radli-Burjan B., Hary A., & Wang X.-C. (2025). Future of agrivoltaic projects: A review from the technological forecasting perspective. *Cleaner Engineering and Technology*, 28, 101057. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101057>

SMALL-SCALE AGRIVOLTAIC SYSTEMS FOR HOUSEHOLDS: A 100 M² PILOT MODULE AND SCALING POTENTIAL TOWARD SMALL BUSINESS DEVELOPMENT

Received Mar. 07, 2026; accepted Jun. 26, 2026
Available online June. 30, 2026

Zurian O.¹, Novytskyi S.²

Author for correspondence: Zurian Oleksii,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ Doctor of Sciences (Engin.)
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

² Postgraduate student
<https://orcid.org/0009-0005-5647-6635>

^{1,2} Institute of Renewable Energy of the
National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

Abstract. *This paper develops a conceptual model of a small-scale agrivoltaic module for a household located on sandy soils in the Kyiv region and evaluates its potential for phased scaling. The relevance of the study is driven by the need to enhance household energy autonomy and to adapt agricultural production to increasing aridity. The objective is to formulate a techno-economic model of a 100 m² starter agrivoltaic module and to develop a formalized threshold criterion for decision-making regarding its implementation, taking into account the potential transition to small-scale business operations. Based on the analysis of specific photovoltaic energy generation and the expected yield reduction under partial shading, a relationship linking the annual energy benefit to potential agricultural losses is proposed. It is demonstrated that with a coverage ratio of 35–40% and moderate yield reduction, the energy effect generally exceeds agricultural losses, ensuring the economic feasibility of the starter module at the household level.*

The scientific novelty of the study lies in the development of a threshold-based decision model for small-scale agrivoltaic systems and in the formulation of a phased scaling strategy from energy-autonomous households to small energy-agricultural businesses, accounting for economic, regulatory, and agronomic uncertainties. Unlike most existing studies focused primarily on large-scale agricultural projects, this work proposes a structured framework for initiating small agrivoltaic projects with risk minimization.

The obtained results indicate the feasibility of agrivoltaics as a strategic development tool for small farms. Further research should focus on experimental validation of the proposed model, refinement of microclimatic impact parameters, and detailed economic assessment of scalable system configurations.

Keywords: *renewable energy, agrivoltaics, semi-transparent photovoltaics, water savings, sandy soils, small-scale farming.*

Abbreviations

AV – agrivoltaic system

SPP – solar power plant

PV – photovoltaic system

PAR – photosynthetically active radiation

STC – standard test conditions

P_{inst} – installed capacity of the photovoltaic system, kW

P_{inst,scale} – installed capacity of the scaled system, kW

A_{cov} – area covered by photovoltaic modules, m²

p_A – specific installed module capacity per unit area, W/m²

EPV – annual electricity generation, kWh

EPV,_{scale} – annual electricity generation for the scaled system, kWh

Y_{spec} – specific annual yield, kWh/kW

Y – baseline crop yield, kg

ΔY – reduction in crop yield, kg

C_{el} – electricity cost, UAH/kWh

C_{crop} – cost of agricultural products, UAH/kg

B_{el} – annual economic benefit from energy generation, UAH

L_{crop} – revenue losses due to reduced crop yield, UAH

C_{tot} – total investment costs, UAH

C_{unit} – specific capital costs per unit of installed capacity, UAH/kW

Introduction. Under conditions of rising electricity costs, increasing climate risks, and instability of energy supply, the issue of household energy independence is becoming strategically important. For owners of household plots and

small farms in the Kyiv Oblast, this problem is combined with another challenge — moisture deficiency in light sandy soils, which is especially pronounced during the summer period. Thus, households simultaneously face two

challenges: the need to ensure a stable energy supply and the need to maintain crop productivity under conditions of water stress.

Agrivoltaics, which involves the combined use of land for electricity generation and agricultural crop cultivation, is considered a promising direction for the integration of the energy and agricultural sectors. However, most studies are focused on large-scale farming or industrial projects, whereas the implementation of small-scale systems for households remains insufficiently investigated. There is currently no clearly defined model for initiating a small agrivoltaic project that would allow assessment of its feasibility at the scale of 100 m² and determination of the prospects for further scaling.

For a household owner, it is critically important to understand not only the technical feasibility of installing solar modules above a land plot, but also the economic balance between potential crop yield losses and the benefits obtained from electricity generation. At the same time, a small pilot module can serve as a tool for risk reduction and a gradual transition toward a small-scale agro-energy business.

In this regard, the development of a starter agrivoltaic module with an area of 100 m² for the conditions of sandy soils in the Kyiv Oblast, followed by an analysis of scaling opportunities, is highly relevant. Such an approach enables combining the objectives of household energy autonomy with a long-term strategy for small business development based on integrated land use.

Problem Statement

The aim of this study is to develop and substantiate a practical model for launching a small-scale agrivoltaic project for a household, using a starter module with an area of 100 m² under the conditions of sandy soils in the Kyiv Oblast, with an assessment of its potential for further scaling to the level of a small business.

To achieve this objective, the following tasks are proposed:

- to develop a technical configuration of a starter agrivoltaic module aimed at ensuring partial household energy autonomy;
- to assess the balance between potential crop yield losses and the benefits of electricity generation;
- to propose a threshold decision-making criterion for determining the feasibility of system implementation at the household level;
- to analyze scaling scenarios from a pilot area of 100 m² to semi-commercial and small-business levels;
- to determine the conditions under which an agrivoltaic project transitions from an energy independence tool to an economically viable entrepreneurial activity.

Thus, the study combines technical, economic, and strategic approaches to the implementation of agrivoltaics at the small-farm level. The proposed approach makes it possible

to combine analytical depth with practical tools that may be useful for both researchers and practitioners.

Literature Review

The issue of integrating photovoltaic systems with agricultural production has been actively developing since the early 2010s. One of the first conceptual approaches to combining electricity generation with crop cultivation was formulated in studies [1], which substantiated the possibility of dual land use. Further development of the agrivoltaic concept was presented in study [2], where the authors proposed models for optimizing the spatial arrangement of photovoltaic modules while considering agrotechnical parameters. Study [3] demonstrated the positive impact of agrivoltaic systems on water balance in arid regions, particularly through reduced evapotranspiration and improved water-use efficiency. Research presented in [4] confirms that the microclimate formed beneath the modules can contribute to stabilizing crop productivity under high-temperature conditions. Similar results regarding the influence of partial shading on plant growth and development are presented in [5], where changes in micrometeorological parameters were analyzed in detail. A separate research direction is devoted to the use of semi-transparent and spectrally selective modules. Study [6] demonstrated that optimization of the spectral composition of transmitted radiation makes it possible to reduce the negative impact of shading on photosynthesis. The critical review presented in [7] systematized approaches to the design of agrivoltaic systems and emphasized the need to adapt structural parameters to specific crops and climatic conditions. At the same time, most existing studies are focused on large-scale farming or industrial projects. Study [8] emphasizes the importance of the economic assessment of integrated systems, while study [9] considers the issue from the perspective of integrated land-use productivity; however, the problem of initiating small-scale projects at the household level has received little attention. Analysis of current trends in agrivoltaic development [10,11] indicates a growing interest in decentralized energy solutions, yet formalized models for the transition from a pilot-scale installation to a scalable small business are still lacking. Thus, despite the considerable number of studies, the problem of developing a starter model for a small-scale agrivoltaic project with an assessment of scaling conditions remains insufficiently investigated, which determines the relevance of this study.

Presentation of the Main Material

The starter agrivoltaic module with an area of 100 m² is considered in this study as the minimum practically implementable unit for introducing a dual land-use system at the household level. Such a scale makes it possible to simultaneously minimize financial risks and obtain representative indicators for further scaling.

The conditions of sandy soils in the Kyiv Oblast are characterized by rapid drying of the topsoil layer, low moisture-retention capacity, and increased crop sensitivity to overheating during the summer period. According to the results

of studies [3–5], partial shading provided by photovoltaic modules can reduce evapotranspiration and stabilize the microclimate within the root zone of plants. These prerequisites form the basis of the starter module concept.

Structurally, the module is designed with the installation of semi-transparent or standard photovoltaic panels with a coverage ratio of 35–40% of the total area. Accordingly, the actual area occupied by the modules amounts to 35–40 m². With a specific installed capacity of 130–160 W/m² (typical for semi-transparent or sparsely arranged structures), the total installed capacity of the system is estimated at 4.5–6.0 kW.

Modern mass-market photovoltaic modules based on silicon cells achieve efficiencies of up to 24.5%, which corresponds to approximately 170–180 W of installed capacity per 1 m² of panel area under Standard Test Conditions (STC). Semi-transparent (spectrally selective) photovoltaic technologies, which combine electricity generation with the transmission of a portion of photosynthetically active radiation, typically exhibit lower specific power density due to the inherent trade-off between optical transparency and electrical conversion efficiency [12].

Installed capacity is determined by the following relation:

$$P_{inst} = A_{cov} \cdot p_A,$$

where A_{cov} - is the module-covered area, m²;

p_A - is the specific module power, W/m².

For average climatic conditions of Central Ukraine, the specific annual yield of photovoltaic systems is approximately 1000–1100 kWh/year [13]. Accordingly, the expected annual energy output of the starter module can be estimated as

$$E_{PV} = P_{inst} \cdot Y_{spec},$$

where Y_{spec} - specific yield (kWh/year)

For a capacity of 5 kW, this corresponds to 5000–5500 kWh per year. Such a level of electricity generation is comparable to the annual electricity consumption of a typical household, which creates the potential for partial or full energy autonomy.

From an agronomic perspective, the module is designed for cultivating crops that are relatively tolerant of moderate shading, in particular strawberries. According to data [5, 9], the permissible reduction in photosynthetically active radiation without a critical decline in yield ranges from 20–40%, depending on climatic conditions and cultivar. In this study, it is assumed that at a coverage ratio of 35–40%, the resulting yield reduction in an average year does not exceed 15–20%, which is consistent with field experiment data reported in [3, 4].

At the same time, the expected reduction in seasonal water consumption may reach 20–30%, which is particularly important for sandy soils. Water savings for a 100 m² area may

amount to 8–12 m³ per season, which is consistent with the results of water balance modeling presented in [9].

From the household perspective, the 100 m² starter module performs three functions:

- provides baseline electricity generation for self-consumption;
- reduces water-related risks in crop cultivation;
- creates an experimental platform for assessing further expansion.

For clarity, the main technical and economic parameters of the starter module are summarized in Table 1.

Table 1. Approximate parameters of a starting agrophotovoltaic module of 100 m²

| No | Indicator | Value |
|----|--------------------------|----------------------|
| 1 | Total area | 100 m ² |
| 2 | Module coverage ratio | 35–40 % |
| 3 | Module area | 35–40 m ² |
| 4 | Installed capacity | 4.5–6.0 kW |
| 5 | Annual energy generation | 4500–5500 kWh |
| 6 | Yield reduction | 15–20 % |
| 7 | Water savings | 20–30 % |

Thus, the 100 m² starter module is considered a balanced configuration that combines an acceptable level of agricultural losses with a significant energy output. Its main advantage lies in the possibility of phased implementation with minimal risks for the household and in the creation of a database for further scaling.

For a household, the decision to install an agrivoltaic system is made not only based on technical feasibility but primarily on the economic balance between the benefits of electricity generation and potential losses in agricultural production. Therefore, it is appropriate to formulate a simple threshold criterion that allows assessing the feasibility of initiating the project on a 100 m² area.

Let us define a notional annual energy income (or savings) from the operation of the photovoltaic system:

$$B_{el} = E_{PV} \cdot C_{el},$$

where E_{PV} - annual electricity generation, kWh,

C_{el} - average household electricity price, UAH/kWh

Potential losses due to reduced crop yield are defined as follows

$$L_{crop} = \Delta Y \cdot C_{crop},$$

where ΔY - reduction in crop yield, kg;

C_{crop} - average selling price of agricultural produce, UAH/kg

The threshold condition for the feasibility of initiating the project is expressed as follows:

$$E_{PV} \cdot C_{el} \succ \Delta Y \cdot C_{crop}.$$

This ratio means that the savings or income from electricity must outweigh the potential losses from reduced yields.

For a 100 m² starter module under the conditions of the Kyiv Oblast, the following approximate parameters can be assumed: annual electricity generation of 4500–5500 kWh (for an installed capacity of about 5 kW), average annual household consumption of 3000–4000 kWh [14], and a residential electricity price of 4–5 UAH/kWh. In this case, the annual savings would amount to:

$$B_{el} \approx 18000-27500 \text{ UAH/year.}$$

If the reduction in crop yield is 15–20% at a baseline yield of 110 kg, the resulting loss in production amounts to 16–22 kg. At a price of 80–120 UAH/kg, the potential losses are equal to:

$$L_{crop} \approx 1280-2640 \text{ UAH/year.}$$

The comparison shows that even at the upper bound of crop losses, the energy effect significantly exceeds the agricultural losses. Thus, for a household with typical electricity consumption, the starter module is economically justified under conditions of moderate shading.

However, in cases of a substantial reduction in crop yield (more than 30%) or a low electricity price, the threshold condition may not be satisfied. Therefore, the key determining factors are the level of shading, the structure of electricity consumption, and the market price of agricultural products.

To summarize the feasibility conditions, Table 2 presents a simplified interpretation of the threshold scenarios.

Table 2. Threshold conditions for the feasibility of starting an agrophotovoltaic module of 100 m²

| Scenario | Energy effect | Crop losses | Decision |
|-----------------------------|---------------|-------------|---------------------|
| Moderate shading (15–20%) | high | low | feasible |
| Strong shading (>30%) | medium | high | requires analysis |
| Low electricity consumption | low | low | limited feasibility |
| Dry year | high | minimal | feasible |

Thus, the proposed threshold model enables a household to assess the feasibility of implementing an agrivoltaic system without complex financial modelling. Its advantage lies in its simplicity of application and adaptability to local conditions, which provides a basis for further project scaling.

Agrivoltaic project scaling model

The 100 m² starter module is considered not only a tool for household energy autonomy, but also a basic structural unit for further expansion. Scaling the agrivoltaic system to areas of 0.1 ha and 0.5 ha changes not only the absolute values of electricity generation and agricultural production, but also the economic logic of the project.

Assuming a constant coverage ratio of 35–40% and similar technical characteristics, it can be assumed that installed capacity increases proportionally with area [15]. Thus, for an area of 0.1 ha (1000 m²), the potential installed capacity would be approximately 45–60 kW, while for 0.5 ha (5000 m²), it would reach 225–300 kW. Accordingly, the expected annual electricity generation is determined by the following relationship

$$E_{PV, scale} = P_{inst, scale} \cdot Y_{spec},$$

where $P_{inst, scale}$ - installed capacity of the system at the corresponding scale,

Y_{spec} - specific annual yield, assumed at 1000–1100 kWh/kW.

At a semi-commercial scale (0.1 ha), this corresponds to 45–66 MWh per year, while for 0.5 ha it amounts to 225–330 MWh per year.

At the same time, the agricultural component also scales accordingly. Assuming a baseline yield of 1.0–1.2 kg/m², the total harvest from an area of 0.1 ha may amount to approximately 1–1.2 t of produce, while for 0.5 ha it may reach 5–6 t [16]. Even with a 15–20% reduction in yield, the agricultural component retains substantial economic significance.

The principal distinction of scaling lies in changes to the cost structure [17]. While for the initial module, the share of expenditures on the inverter, electrical equipment, and installation is relatively high per 1 m², an economy-of-scale effect is observed as the area increases: the share of capital expenditures per unit of installed capacity decreases. Similar economy-of-scale patterns are characteristic of photovoltaic systems in general and are described in [2, 8].

For clarity, the scaling results are presented in the Table 3.

Scaling changes the nature of the project. While at the 100 m² level the system is primarily oriented toward electricity self-sufficiency and risk reduction, at the 0.1 ha level opportunities emerge for the sale of surplus electricity or agricultural produce. In areas of approximately 0.5 ha, agrivoltaics can already be considered a fully-fledged component of a small business model [18].

Table 3. Approximate scaling parameters of an agrophotovoltaic project

| Indicator | 100 m ² | 0.1 ha | 0.5 ha |
|-------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------|
| Installed capacity | ~5 kW | 45–60 kW | 225–300 kW |
| Annual electricity generation | 5–5.5 MWh | 45–66 MWh | 225–330 MWh |
| Yield (baseline) | 0.1 t | 1–1.2 t | 5–6 t |
| Yield reduction (15–20%) | 0.016–0.022 t | 0.15–0.24 t | 0.75–1.2 t |
| Economic rationale | self-sufficiency | partial commercialization | business model |

However, it is important to consider that, as the area increases, the requirements for regulatory compliance, grid connection, financing, and agronomic support also become more demanding. Therefore, scaling should be implemented progressively — from a pilot module to a semi-commercial level, with the gradual accumulation of empirical data.

Thus, the proposed scaling model demonstrates that a 100 m² initial module can serve as the foundational element for the gradual development of the project, thereby reducing financial risks and enabling the accumulation of operational experience prior to transition to the commercial scale.

Nevertheless, the proposed proportional scaling should not be regarded as a fully linear process. As the area of the agri-voltaic system increases, additional uncertainty factors arise that may affect both the technical and economic performance indicators of the project, resulting in an overall effect that may be either positive or negative (Fig. 1).

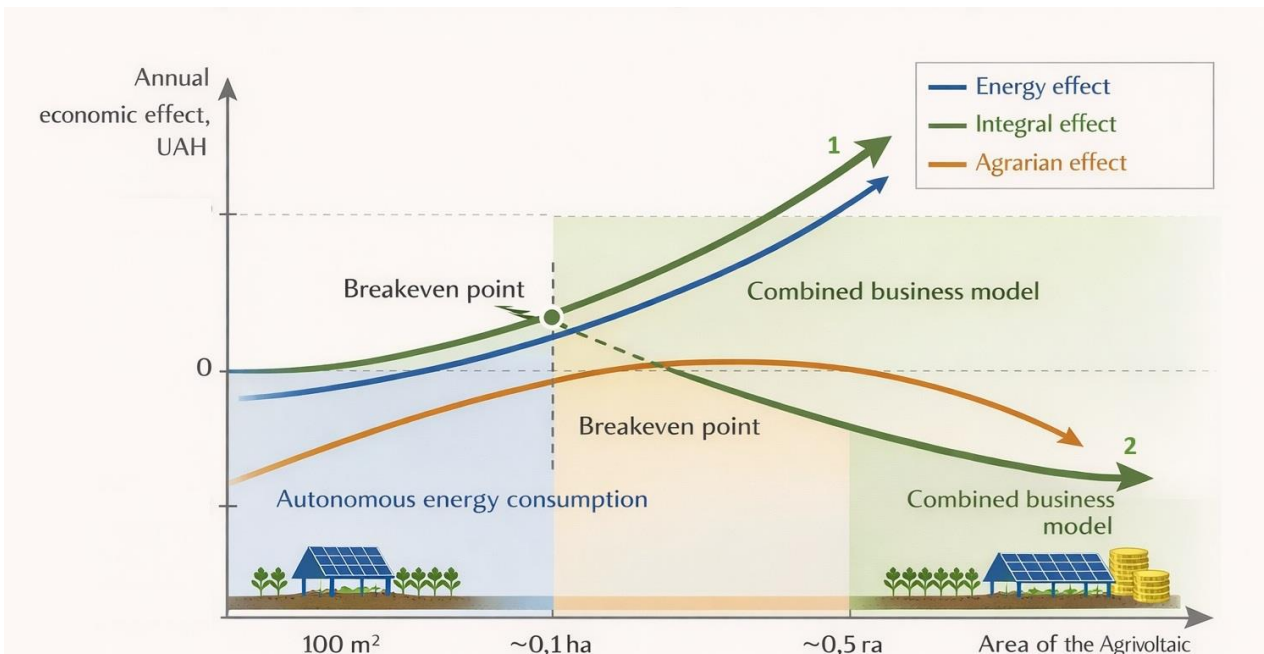


Fig. 1. Possible development trajectories of an agrophotovoltaic project from a starter module to a small business, taking into account the uncertainty factor

First, economies of scale are not entirely proportional. For the initial 100 m² module, a significant share of expenditures is associated with the inverter, protection system, design, and installation. As the area increases to 0.1 ha and beyond, a reduction in specific capital costs per 1 kW of installed capacity is observed due to the more efficient utilization of equipment and structural components. In simplified form, this may be described by the following relation:

$$C_{unit} = \frac{C_{tot}}{P_{inst}}$$

where C_{unit} - specific capital cost per 1 kW,

C_{tot} - total investment cost,

P_{inst} - installed capacity.

As P_{inst} increases, the value of C_{unit} tends to decrease. However, beyond a certain threshold, additional expenditures related to grid connection, engineering design, and permitting procedures may partially offset this effect [19].

Second, regulatory constraints may constitute a barrier to scaling. While, for a small installation intended for self-consumption, the grid connection procedure is relatively simplified, the transition to systems with capacities of tens or hundreds of kilowatts requires the approval of technical conditions, potential grid reinforcement, and changes in the legal status of the business entity. This implies that the transition from a household-scale system to a small

business involves not only an increase in capacity but also a transformation of the regulatory environment.

Third, agronomic risks increase with scale. While, on a 100 m² area, ensuring irrigation uniformity and microclimate control is relatively straightforward, at an area of 0.5 ha, factors such as spatial soil heterogeneity, uneven shading, and increased complexity of technical maintenance emerge [20]. These factors may affect the actual level of yield reduction and require the adaptation of agronomic practices.

Thus, the scaling of an agrivoltaic project should be considered as a phased process involving the gradual expansion of the area and the analysis of the actual performance results of the initial module. In this context, the 100 m² pilot site serves as a tool for reducing uncertainty, enabling the empirical refinement of parameters related to crop yield, water consumption, and energy generation prior to transitioning to the semi-commercial level.

The proposed 100 m² initial module is regarded not as an isolated technical solution, but as the first stage in the development trajectory of an agrivoltaic project. The development strategy envisages a gradual transition from ensuring the energy autonomy of a household toward the establishment of an economically self-sustaining business model.

At the first stage (pilot level), the agrivoltaic system performs the function of reducing energy dependence and water-related risks. The primary objective is to cover the household's own electricity consumption and to accumulate empirical data regarding crop yield, water consumption, and the operational stability of the equipment. The

financial risk at this stage is relatively limited, since even partial electricity generation provides cost savings for the household.

At the second stage (semi-commercial level, approximately 0.1 ha), the system begins to generate surplus electricity or an increased volume of agricultural produce for sale. At this stage, a dual economic effect is formed: income from the sale of agricultural products is combined with the potential sale of electricity or compensation for the system's own electricity consumption. Analysis of product sales markets and grid starts to be important.

At the third stage (with a scale of approximately 0.5 ha), the agrivoltaic project may evolve into a small business with a clearly defined entrepreneurial model. In this case, the following factors play a key role:

- stability of agricultural productivity;
- predictability of energy generation output;
- optimization of maintenance costs;
- regulatory support for commercial operations.

The transition between stages should be carried out only if the threshold condition of economic feasibility formulated in the previous section is satisfied. Furthermore, the decision to scale up should be based on the actual operational results of the initial module over at least one growing season.

Schematically, the development strategy may be represented as a sequence of three phases (Fig. 2)

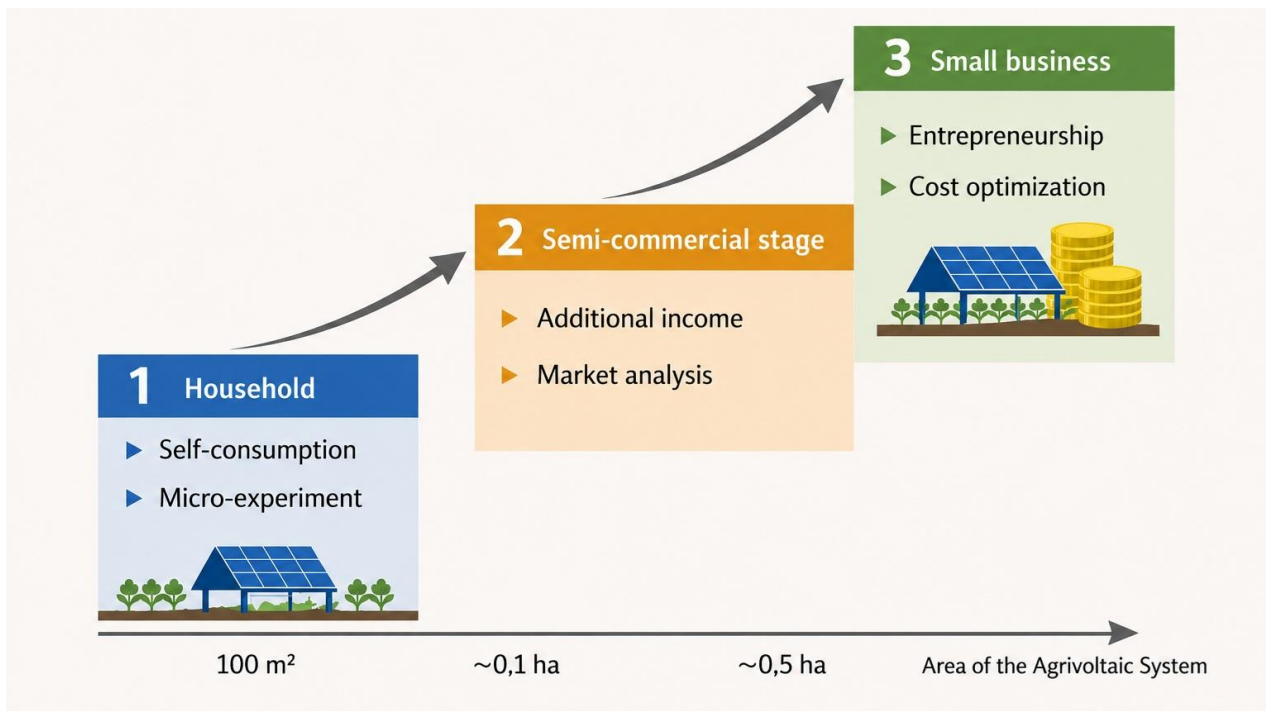


Fig. 2. Stages of development of an agrivoltaic project from household to small business

A distinctive feature of the proposed approach is the integration of technical and strategic planning. Unlike large-scale centralized agrivoltaic projects, where scaling is

implemented immediately over extensive areas, the household-oriented model provides gradual capacity expansion accompanied by simultaneous risk reduction.

Thus, agrivoltaics in the context of the sandy soils of the Kyiv region may be considered not only a tool for the dual use of land resources but also a mechanism for establishing a resilient local energy-agricultural system. It is precisely the phased development approach that enables adaptation to climatic, economic, and regulatory conditions and creates the foundation for transforming a household into a small-scale energy-agricultural business.

Conclusion

1. This study proposes the concept of a starter agrivoltaic module with an area of 100 m² for the conditions of sandy soils in the Kyiv region, aimed at ensuring partial or complete energy autonomy of a household. It is shown that, with a coverage ratio of 35–40%, the system can provide electricity generation at a level comparable to the annual consumption of a typical household.
2. A threshold-based decision-making model for the implementation of an agrivoltaic system has been formulated, based on the relationship between savings from electricity generation and losses caused by a possible reduction in crop yield. The proposed criterion makes it possible to assess the project feasibility without complex financial modeling and can be adapted to local pricing conditions.
3. It has been demonstrated that under conditions of moderate shading (15–20% reduction in crop yield), the energy benefits substantially exceed agricultural losses in most scenarios, making the starter module economically feasible for a household.
4. A phased scaling model has been developed, ranging from a 100 m² pilot plot to a semi-commercial level (0.1 ha) and a small business level (0.5 ha). It has been established that scaling is accompanied by a shift in the project's economic logic — from autonomous energy consumption to a combined business model with dual sources of income.
5. It has been found that scaling is not a linear process and is associated with economic, regulatory, and agronomic risks. The reduction in specific capital costs with increasing area may compensate for part of the additional expenses; however, this requires phased implementation and analysis of the actual performance results of the starter module.
6. The proposed approach makes it possible to consider agrivoltaics not only as a technological solution, but also as a tool for the strategic development of a household with the potential transformation into a small-scale energy-agricultural business.

Figures 1–2 were created by the authors using artificial intelligence tools based on the methodology developed in the study and the results obtained.

REFERENCES

1. Goetzberger A., Zastrow A. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*. 1982. Vol. 1. P. 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
2. Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard Y. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*. 2011. Vol. 36. P. 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
3. Barron-Gafford G. A., Pavao-Zuckerman M. A., Minor R. L. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*. 2019. Vol. 2. P. 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
4. Adeh E. H., Selker J. S., Higgins C. W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13(11). e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
5. Marrou H., Guillioni L., Dufour L., Dupraz C., Wery J. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013. Vol. 177. P. 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>
6. Toledo C., Scognamiglio A. Agrivoltaic systems design and assessment: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 148. 111295. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111295>
7. Weselek A., Ehmann A., Zikeli S., Lewandowski I., Schindele S., Högy P. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. *Agronomy for Sustainable Development*. 2019. Vol. 39. Article 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
8. Zurian O., Tolkunov, A., Omelchenko T. (2025). Risk considerations in the study of investment attractiveness of geothermal energy objects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(109), 97-103. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.13>
9. Valle B., Simonneau T., Sourd F., et al. Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy*. 2017. Vol. 206. P. 1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>
10. Elamri Y., Cheviron B., Lopez J. M., Dejean C., Belaud G. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuce. *Agricultural Water Management*. 2018. Vol. 208. P. 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.015>

11. Shafidah Shafian. Semitransparent Solar Cells for Agriculture Application. *Future Energy and Environment Letters* 3, Issue 1 (2025) 1-18. <https://doi.org/10.37934/feel.3.1.118>
12. Novytskyi S., Zurian O. Photoelectric converters. types, efficiency. *Visnyk of Kherson National Technical University*. No. 1(88) (2024). 92-102. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12>
13. Kudrya S. O. Renewable energy sources. Institute of Energy and Power Engineering of the NAS of Ukraine. Monograph. 511 p.
14. https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vidnovliuvani_Djerela_Monography_2025.pdf
15. Matiakh S., Ausheva N., Kardashov O., Bondarenko D. (2025). Determination of the photovoltaic potential of territorial communities of Ukraine using geoinformation systems. *Vidnovluvana Energetika*, (4(83)), 165-188. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4\(83\).165-188](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4(83).165-188)
16. Surzhyk T. V. Scientific and Technical Principles for Improving the Energy and Techno-Economic Efficiency of Solar Radiation Energy Conversion Systems : Doctor of Technical Sciences Dissertation : Specialty 05.14.08 – Conversion of Renewable Energy Sources. Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2021.
17. Havrysh V.; Kalinichenko A.; Szafranek E.; Hruban V. Agricultural Land: Crop Production or Photovoltaic Power Plants. *Sustainability* 2022, 14, 5099. <https://doi.org/10.3390/su14095099>
18. Bondarenko D., Matyakh S., Surzhyk T., Shevchuk V. (2023). Energy unit kit for photovoltaic cluster. *Vidnovluvana Energetika* , (3(74)), 53-58. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).53-58](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).53-58)
19. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).53-58](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).53-58)
20. 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)
21. Taylor M., McDonnell N., Davies P. et al. Scaling agrivoltaics: planning, legal, and market pathways to readiness. *Sustain Sci* 20, 1499–1517 (2025).
22. <https://doi.org/10.1007/s11625-025-01668-w>
21. Pekk L., Varbanov P. S., Pan T., Weltsch Z., Radli-Burjan B., Hary A., & Wang X.-C. (2025). Future of agrivoltaic projects: A review from the technological forecasting perspective. *Cleaner Engineering and Technology*, 28, 101057. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101057>