

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 519.8

DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/179-22>**Горбачук В. М.**

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5619-6979>

Дунаєвський М. С.

магістр,
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6926-398X>

Сулейманов С.-Б.

магістр,
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України

Gorbachuk Vasyl, Dunaievskiy Maksym, Suleimanov Seit-Bekir
V.M.Glushkov Institute of Cybernetics, National Academy of Sciences of Ukraine

МОДЕЛЮВАННЯ САМОПІДТРИМУВАНИХ СТРАТЕГІЙ ДЛЯ УРЯДОВОЇ ФІНАНСОВОЇ СИСТЕМИ, ДЕРЖАВНОЇ БАНКІВСЬКОЇ СИСТЕМИ ТА ІНВЕСТИЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГОГЕНЕРАЦІЇ

На початку третього тисячоліття широку увагу привертають виснаження викопних джерел енергії та забруднення довкілля, спричинене швидким зростанням попиту на енергію: досліджувалися відгук попиту, планування робіт, виробництво електроенергії з відновлюваних джерел. Виробництво електроенергії з відновлюваних джерел є важливим способом сприяння енергозбереженню та поліпшення енергоефективності. Серед відновлюваних джерел одними з найпоширеніших і найперспективніших є джерела сонячної енергії. Проте нестабільність вихідної потужності, спричинена мінливістю і змінною природою відновлюваних джерел енергії, породжує виклики для широкомасштабної диспетчеризації потужності. Крім того, розвиток фотоелектричної галузі стримували тривалий період віддачі на інвестиції у сонячну фотоелектричну енергію та потреба у великих початкових капіталовкладеннях. Для задоволення зростаючого попиту на енергію та зменшення викидів вуглекислого газу багато держав активно підтримує поширення фотоелектричного енергогенеруючого обладнання. При цьому урядова фінансова система і державна банківська система відіграють ключову роль у сприянні відповідним інвестиціям. Взаємодія урядової фінансової системи, державної банківської системи та інвестиційної системи фотоелектричного енергогенеруючого обладнання може вести до стійких стратегій цих трьох сторін (включаючи обсяги урядових субсидій і банківських позик) на розподіленому державному ринку фотоелектричної енергії в залежності від рівня розвитку цього ринку. Оскільки ринок може перебувати на початковому, середньому і зрілому рівні свого розвитку, то немає гарантії, що будь-який рівень розвитку ринку однаково сприятиме інвестиціям у фотоелектричне енергогенеруюче обладнання. Можна припустити, що урядові субсидії та банківські позики відіграють важливішу роль на середньому рівні розвитку ринку фотоелектричної енергії. Крім того, урядова фінансова система і державна банківська система сприяють встановленню обладнання більшої фотоелектричної потужності з вищими інвестиційними витратами.

Ключові слова: розподілений державний ринок, фотоелектричне енергогенеруюче обладнання, енергоефективність, урядові субсидії, банківські позики.

SUSTAINABLE STRATEGIES MODELING FOR GOVERNMENT FINANCIAL SYSTEM, THE STATE BANKING SYSTEM, AND THE INVESTMENT SYSTEM OF RENEWABLE POWER GENERATION

The interaction of the government financial system, the state banking system, and the investment system of renewable photovoltaic (PV) power generation equipment can lead to sustainable strategies of these three parties (including government subsidies and bank loans) in the distributed state PV-market depending on its level of development. However, the instability of power output, caused by the variability and changing nature of renewable energy sources, poses challenges for large-scale power dispatch. In addition, the development of the PV-industry has been constrained by a long period of return on investment in solar photovoltaics and the need for large initial investments. With the rapid development of the sharing economy, the provision of financial support and the sharing of investment risks among investors in the PV-energy have become key means of promoting the

PV-industry. State incentive policy was considered an effective approach to significant promotion of PV-systems. Government subsidies reduce the need for large initial investments, and market mechanisms, such as feed-in tariffs and tax rebates, increase return on investment and reduce payback periods. In addition, bank loans are considered another major source of external financing for the development of the PV-industry. Third-party financing with appropriate risk-sharing is considered an effective approach to promote the use of photovoltaic technologies. As government subsidies put pressure on the state budget and bank loans require banks to take significant credit risks, there are clear barriers to governments and banks supporting the development of the PV-industry. By 2022, the issues of computing such targeted government subsidies and bank loans with limited credit risks, which maximize incentives for the diffusion of PV-technologies, remain underdeveloped. The current important issues for suggested numerical studying and modeling are: can government subsidies and bank loans significantly contribute to the diffusion of PV-installations at various levels of the PV-market development; what evolutionarily stable states will be formed at different levels of the PV-market development; how the volume of government subsidies, the share of bank loans, the capacity of PV-installations by investors will affect the evolutionary trajectories of the all PV-market parameters and the transformation of various evolutionarily stable states. To do this, numerical modeling is performed to study the dynamic evolutionary trajectories at different levels of the PV-market development.

Keywords: distributed state market, photovoltaic power generating equipment, energy efficiency, government subsidies, bank loans.

JEL classification: H42, H81, L52

Постановка проблеми. Виснаження викопних ресурсів, зміна клімату та інші проблеми довкілля й безпеки, спричинені масовим споживанням енергії, пояснюють значну увагу до самопідтримуваної енергогенерації. Відновлювана енергогенерація виявилася перспективним рішенням у питаннях зміни клімату та інших екологічних питаннях за рахунок зменшення споживання викопного палива [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. 8 лютого 2022 р. відома норвезька компанія Emerge повідомила про відтермінування будівництва найбільшої в Європі вітрової електростанції (ЕС) «Зофія» у Мелітопольському районі Запорізької області України через такі причини: постійні питання з отриманням оплати від державного підприємства «Гарантований покупець», який є покупцем відновлюваної енергії (на погляд Emerge, в уряді відсутнє чітке бачення процедури аукціонів); труднощі із залученням масштабних прямих іноземних інвестицій на ринок відновлюваної енергетики України (частково через геополітичну ситуацію з Російською Федерацією); короткий проміжок часу, що залишився для будівництва та введення в експлуатацію вітрових ЕС (відповідно до чинного законодавства України, для отримання стимулювання всі об'єкти відновлюваної енергії мають бути введені в експлуатацію до кінця 2022 р.) [2]. Emerge розбудувала певну інфраструктуру проекту, а у період перед відновленням будівництва аналізуватиме альтернативні можливості реалізації електроенергії, включаючи продажі електроенергії великим споживачам на основі двосторонніх договорів.

Плановані прямі іноземні інвестиції у проект «Зофія» перевищували 1 млрд. євро, а основним підрядником планувалася компанія China Electric Power Equipment and Technology Co Ltd – дочірня компанія Державної електромережевої корпорації Китаю (State Grid Corporation of China) [3].

12 лютого 2022 р., через 4 дні після оприлюднення згаданого рішення Emerge, міжнародні страхові компанії почали припиняти підтримку авіасполучення з Україною. 24 лютого 2022 р., через 16 днів після рішення Emerge, Російська Федерація (РФ) розпочала війну проти України по всьому кордону (Луганська, Сумська, Харківська, Чернігівська області), а також по межі Запорізької і Херсонської областей з тимчасово окупованим у 2014 р. РФ Кримом, по межі з тимчасово окупованими у 2014 р. РФ районами Донецької і

Луганської областей, по кордону Житомирської, Київської, Чернігівської областей з Білоруссю, завдаючи при цьому ударів крилатими і балістичними ракетами (включаючи озброєння, передане РФ від України внаслідок Будапештського меморандуму 1994 р.) по інших регіонах України. Основні цілі нападу – об'єкти державної і критичної інфраструктури, включаючи об'єкти енергетики. Того ж дня війська РФ захопили Каховську та Київську гідроелектричні ЕС (ГЕС), Чорнобильську атомну ЕС (де у 1986 р. сталася найбільша в людській історії ядерна катастрофа, яка стала каталізатором розпаду СРСР), а також територію вітрової ЕС «Зофія».

Системний аналіз подій в Україні у лютому – березні 2022 р. виклав відомий експерт з цифрових технологій Томі Ахонен [4], який у 1989 р. здобув науковий ступінь магістра ділового адміністрування Університету Сент-Джонс (заснований у 1870 р.) США, у 1999–2001 рр. працював глобальним керівником бізнес-консалтингу 3G компанії Nokia, з 2001 р. очолює фірму TomiAhonen Consulting. Світовий банк дослідив вплив агресії РФ проти України на Європу та Центральну Азію [5], але без пропозицій відповідей на сучасні виклики до критичних інфраструктур, зокрема енергетичних [6].

Невирішена частина загальної проблеми полягає у дослідженні інтегрованих самопідтримуваних механізмів підтримки енергетичної інфраструктури.

Мета статті. Безпрецедентність збройного захоплення двох АЕС 24 лютого і 4 березня 2022 р. свідчить про потребу розробки моделей і заходів підтримки критичної інфраструктури, зокрема енергетики, у форс-мажорних обставинах в умовах так званих катастрофічних ризиків [7; 8]. Посилання на такі обставини стало підставою для міжнародних страхових компаній припиняти підтримку авіасполучення з Україною, але особливістю енергетичної інфраструктури є складність або неможливість одномоментної зупинки її роботи. Мета роботи – показати, як сучасна альтернативна енергетика розширює арсенал технологічних і організаційних засобів енергетичної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. До Чорнобильської катастрофи атомна енергетика вважалася новітньою, альтернативною до традиційної енергетики. Оскільки впровадження інноваційних енергетичних технологій загалом має певні закономірності, особливо з погляду системного та інтегрованого підходу, то для ефективного застосування альтернативної енергетики сучасності є корисним досвід альтернативної енергетики

недавнього минулого [9]: за даними Державного агентства України з управління зоною відчуження, РФ під час тимчасової окупації Чорнобильської АЕС у 2022 р. знищила архіви Чорнобильської зони, які накопичувалися десятки років і виявилися корисними для діяльності українських експертів (колег одного з авторів даної роботи) при ліквідації наслідків аварії на АЕС Фукусіма (Японія), починаючи з 2011 р.

26 лютого 2022 р., через 2 дні після вторгнення військ РФ у 9 регіонів України з Півночі, Сходу, Півдня, війська України відбили Київську ГЕС; персонал Київської ГЕС перебував у сховищі; Київська ГЕС не працювала. Вийшовши з Криму і пройшовши Херсонську область, 26 лютого війська РФ наблизилися до м. Енергодар (Василівський район Запорізької області), де розташована найбільша в Європі атомна ЕС – Запорізька атомна ЕС (АЕС). Використовуючи близькість до Запорізької АЕС для свого захисту, війська РФ у напрямі Запорізької АЕС розмістили реактивні системи залпового вогню з максимальною дальністю 42 км. Оточуючи м. Енергодар, 27 лютого війська РФ з боями рухалися від райцентру с. Велика Білозерка до м. Дніпрорудне та райцентру м. Василівка, а диверсійні групи РФ почали діяти у м. Енергодар. 28 лютого війська РФ зосередили у с. Дніпровка близько 90 одиниць військової техніки і досягнули меж м. Енергодар. 1 березня Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) втратило зв'язок зі станціями моніторингу Запорізької АЕС. Три доби (28 лютого, 1 березня, 2 березня) тисячі мирних жителів м. Енергодар, включаючи працівників Запорізької АЕС, блокували захоплення Запорізької АЕС військами РФ.

Відсутність достатньої і достатньо швидкої проактивної реакції на дії військових РФ навколо оточеної АЕС України була сприйнята РФ як дозвіл на ескалацію. 2 березня проти мирних жителів с. Водяне біля м. Енергодар війська РФ застосували бойові гранати. 3 березня близько 100 одиниць бронетехніки РФ з боями увійшли до м. Енергодар, а вночі 4 березня на території Запорізької АЕС внаслідок обстрілів танками РФ виникла масштабна пожежа, яку війська РФ дозволили ліквідувати підрозділам Державної служби України з надзвичайних ситуацій лише після закінчення бою. На цій території, крім шести атомних енергоблоків, також розташоване сховище відпрацьованого ядерного палива. Під час оборони Запорізької АЕС загинули три бійці Національної гвардії України, відповідальної за охорону об'єктів критичної інфраструктури.

Очевидно, що спроможностей лише Національної гвардії атакованої країни недостатньо для захисту АЕС у форс-мажорних обставинах чи умовах катастрофічних ризиків [7, 10]. Наприклад, у таких обставинах міжнародні страхові компанії та інші фінансово-економічні приватні, національні і міжнародні організації можуть вживати своєчасних заходів, подібних до превентивних заходів припинення підтримки авіасполучення з Україною, починаючи з 12 лютого 2022 р., тобто за 12 днів до ракетних атак.

Під час штурму Запорізької АЕС до єдиної енергосистеми України був підключений лише один з шести енергоблоків цієї АЕС. Після обстрілів і пожежі м. Енергодар втратило теплопостачання. 4 березня Державна інспекція ядерного регулювання України

(ДІЯРУ) повідомила МАГАТЕ про перше в історії збройне захоплення працюючої АЕС. Генеральний директор МАГАТЕ на прес-конференції заявив, що «обстріл в районі атомної електростанції порушує фундаментальний принцип захисту атомних об'єктів». МАГАТЕ створило центр реагування через пожежу на Запорізькій АЕС. 6 березня ДІЯРУ повідомила МАГАТЕ про неможливість отримання інформації про статус об'єкта через втрату зв'язку із Запорізькою АЕС телефоном, факсом, електронною поштою; генеральний директор МАГАТЕ висловив глибоке занепокоєння повідомленням про те, що війська РФ вимагають узгоджувати з ними будь-яку взаємодію з атомним об'єктом. Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія Енергоатом» повідомило, що персонал Запорізької АЕС кілька днів перебуває у заручниках і має проблеми регулярного постачання продовольства. 7 березня ДІЯРУ повідомила МАГАТЕ, що Запорізька АЕС не може отримувати необхідні запасні частини і ліки. МАГАТЕ перестало отримувати дані запобіжної системи моніторингу цієї АЕС. За повідомленням ДІЯРУ, половина основних високовольтних ліній електропередач цієї АЕС була пошкоджена, а трансформатор одного з енергоблоків було відправлено на аварійний ремонт внаслідок ураження системи охолодження під час боїв 4 березня. Під час цих боїв зазнали ушкоджень споруди реакторного відділення іншого енергоблоку.

4 березня 2022 р. Велика Британія скликала екстрене засідання Ради безпеки ООН через захоплення РФ Запорізької АЕС. На цьому засіданні постійний представник США в ООН Лінда Томас-Грінфілд офіційно заявила: «Милістю Божою минулої ночі світ ледве відвернув ядерну катастрофу. Ми всі чекали, щоб видихнути, спостерігаючи, як жахлива ситуація розгортається в реальному часі. Я вітаю здатність українських операторів утримувати всі шість реакторів у безпечних умовах під час атаки і звітувати, наскільки вони були в змозі, своєму ядерному регулятору. Крім того, ми вдячні Державній інспекції ядерного регулювання України за її неперервні повідомлення до МАГАТЕ та міжнародної спільноти. Ми серйозно стурбовані тим, що українські оператори зараз виконують свою роботу під надзвичайним примусом. Атака Росії минулої ночі поставила найбільшу в Європі атомну електростанцію під серйозну небезпеку. Це було неймовірно необачно і небезпечно. І це загрожує безпеці мирного населення Росії, України та Європи. В якості першого кроку ми закликаємо Росію вивести свої війська зі станції, щоб уможливити медичну допомогу пораненим серед персоналу, забезпечити операторам повний доступ до об'єкта і здатність зв'язуватися з ядерними регуляторами, а також дозволити операторам проводити зміни для гарантування безперервної безпечної роботи електростанції. Українські пожежники та інженери-атомники повинні мати повний доступ до ядерної установки, щоб оцінювати пошкодження, зокрема водозабірних трубопроводів, і запобігати подальшому погіршенню ситуації за потреби. Ядерні об'єкти не можуть стати частиною цього конфлікту. Надійна електрика є життєво важливою для ядерного об'єкта, як і резервні дизельні генератори та паливо. Треба підтримувати безпечні транзитні коридори. Росія має припинити будь-яке подальше застосування сили, яке може

ставити під загрозу всі 15 працездатних реакторів по всій Україні – або втручатися у здатність України підтримувати безпеку своїх 37 ядерних об'єктів і населення навколо них. Сполучені Штати залишаються дуже занепокоєними тим, що російські військові сили, які контролюють Чорнобильську територію, не дозволили там операторам провести зміну персоналу з минулого тижня. Це є дуже безвідповідальною поведінкою і викликає серйозні занепокоєння щодо подальшої безпечної роботи обох об'єктів [Чорнобильської та Запорізької АЕС] ... Росія руйнує критичну інфраструктуру, відмовляючи людям у питній воді, необхідній для виживання, та паливі, необхідному для того, щоб люди не замерзли посеред зими. Гуманітарний вплив цих руйнувань буде значним».

Після штурму на території Запорізької АЕС перебували близько 50 одиниць важкої техніки і 500 військових РФ, використовуючи АЕС в якості щита на чужій території. Голова Запорізької обласної військової адміністрації повідомив про факти мародерства зі застосуванням зброї з боку військових РФ у м. Енергодар. У м. Енергодар виникли проблеми зі зв'язком і постачанням продовольства. Війська РФ у м. Енергодар захопили і вивели з ладу обладнання акціонерного товариства «Укртелеком», найбільшого в Україні оператора комплексних послуг зв'язку. Міський голова м. Енергодар планував організувати харчування раз на добу для жителів міста. 9 березня, через 5 днів після штурму АЕС, під егідою Міжнародного Комітету Червоного Хреста розпочалася евакуація мешканців м. Енергодар і навколишніх сіл до обласного центру м. Запоріжжя.

За даними Агентства ООН у справах біженців, через 5 тижнів після початку агресії РФ проти України кількість біженців з України в інші держави перевищила 4 млн. людей (близько 10% усього населення держави), половину з яких становили діти. Іншими словами, за 5 тижнів з України виїхало більше людей, ніж населення понад 20 європейських держав, таких як Хорватія, Грузія, Боснія і Герцеговина, Вірменія, Албанія, Литва, Молдова, Словенія, Латвія, Північна Македонія, Косово, Естонія, Кіпр, Люксембург, Чорногорія, Мальта, Ісландія та інші.

Забезпечення біженців вимагає значних додаткових витрат. Наприклад, конференція донорів прийняла рішення про виділення 700 млн. євро Молдові у вигляді бюджетної підтримки, кредитів та інших форм фінансової допомоги для понад 90 тис. біженців з України (спочатку у Молдові було понад 360 тис. біженців з України), що означає витрати на одного біженця, які майже на $\frac{700000 \times 1,09}{90 \times 4792} - 1 \sim 0,77 = 77\%$ перевищують

довоєнний номінальний валовий внутрішній продукт (ВВП) Молдові на душу населення. Уряд Швеції виділяє 1,1 млрд. євро на понад 30 тис. біженців з України. Таким чином, лише прямі витрати на біженців з України можуть перевищувати $\frac{4000 \times 1,1}{30} \sim 147$ млрд. євро,

тобто майже річний обсяг довоєнного ВВП України. За даними Агентства ООН у справах біженців, кількість біженців у межах України приблизно вдвічі перевищує кількість біженців з України, а мільйони людей не можуть виїхати із зон небезпеки через підвищені

ризиків, руйнування мостів і доріг, через брак ресурсів чи інформації. За даними уряду України, за 5 тижнів збитки України від агресії РФ перевищили 1 трлн. дол., тобто приблизно 5 довоєнних ВВП України. Подібні показники можуть служити оцінками адекватної відповіді агресору чи терористу [7; 11].

Оскільки великі та поширені ресурси сонячної радіації все більше вважаються одними з основних відновлюваних енергоджерел, то такі ресурси активно просуваються багатьма державами. Хоча деякі країни мають багаті ресурси сонячної радіації та чималий потенціал для їх застосування, вартість сонячної енергогенерації залишається високою через відсталість технологій виробництва у цих країнах. Крім того, очікуваний тривалий період окупності, необхідність великих початкових інвестицій, високі ризики для мінливої та непередбачуваної відновлюваної енергії створюють додаткові труднощі для інвестицій на фотоелектричному (photovoltaic, PV) ринку у будь-якій країні. Тому стан інвестицій на PV-ринку країни значною мірою залежить від політики її уряду.

Відповідним чином відібрані урядові інструменти можуть сприяти вирішенню поточних екологічних проблем шляхом розгортання малих PV-установок. Одним з механізмів урядового стимулювання побутових споживачів (residential prosumers) є модель Штакельберга. Важливими факторами, які впливають на прийняття рішень про інвестиції у PV-технології у конкретному місці (регіоні), є регіональна інтенсивність сонячного випромінювання (regional solar radiation intensity, SRI), зважена вартість електрики (levelized cost of electricity, LCOE) [12] та пільгові тарифи (feed-in tariffs, FITs), наприклад, так звані зелені тарифи в Україні. Можна показати, що економічна роль урядових субсидій у малі однорідні PV-установки поступово знижується. Роль урядових субсидій на PV-ринку поступово змінюється від стимулювання мешканців до початкових інвестицій у PV-установки до стимулювання у PV-установки більшої потужності. Відповідна урядова субсидія може зменшувати обмеження SRI, LCOE, FIT на встановлення PV-установок жителями регіонів. Водночас отримані результати [13] свідчать, що оптимальної субсидії, встановленої відповідно до умов конкретних регіонів, достатньо для того, щоб спонукати жителів до встановлення PV-установок і максимізації вигадів уряду та жителів, позаяк політика єдиної субсидії є менш ефективною порівняно з політикою регіональних субсидій. Ці результати можуть корисними для вироблення рекомендацій для осіб, які приймають рішення про ефективні та цільові стратегії [14].

Деякі держави мають специфічні стратегії стимулювання централізованих PV-електростанцій і малих розподілених PV-установок: централізовані PV-електростанції стимулюють пільговими тарифами і субсидіями, а розподілені PV-установки – субсидіями за одиницю виробленої енергії. Наприклад, важливими засобами стимулювання впровадження PV-генерації можуть бути регіональні пільгові тарифи. Відповідно до них вся територія держави поділяється на кілька ресурсних зон, виходячи з регіональних ресурсів сонячної радіації, а тому кожний регіон має свій власний рівень FIT. Результати вивчення політики FIT для централізованих PV-електростанцій можна застосувати до розподілених PV-установок, серед яких виділяються

дві групи – промислові та комерційні PV-установки, а також побутові (житлові) PV-установки. Для цих груп використовуються різні стратегії субсидій. Стратегія субсидій для промислових і комерційних PV-установок залежить від того, наскільки PV-установка стосується власного виробництва, власного споживання, продажу надлишкової чи всієї електрики. Незалежно від прийнятої моделі продажу електрики, застосовують єдину стратегію субсидій для житлових розподілених PV-установок – субсидій за одиницю виробленої енергії.

Побутові споживачі, які мешкають у житлових приміщеннях, є одними з основних довгострокових споживачів електроенергії, а тому мають потенційну можливість перетворюватися в інвесторів у малі розподілені сонячні PV-установки. У порівнянні з централізованими великомасштабними PV-електростанціями чи промисловими і комерційними PV-установками, маломасштабні житлові розподілені PV-установки мають багато специфічних переваг: зниження початкових (upfront) інвестицій, необхідних для побудови централізованої електростанції; зменшення втрат на лінії, спричинених передачею електрики на великі відстані; поліпшення балансування між пропозицією та попитом на електрику за рахунок обмеженості географічного простору. Щоб сприяти заселенню мешканців у невеликі житлові приміщення та їх перетворенню в енергоспоживачів енергосистеми, уряд має застосовувати відповідні стратегічні інструменти стимулювання мешканців до планування інвестицій у PV-установки.

Відомі дослідження впливу державної політики стимулювання на житлові PV-установки. Деякі оцінки ефективності державних і комунальних стимулів для сприяння впровадженню житлових сонячних PV-установок показують, що кожний додатковий долар на стимулювання веде в середньому до додаткових 500 W встановленої потужності. Опитування та експерименти показують, що субсидія – важливий фактор стимулювання впровадження сонячних PV-установок. Ці дослідження підтверджують очевидний вплив урядових субсидій на такі впровадження, але обставини до рівні цього впливу залишаються маловивченими, що гальмує ефективну і цілеспрямовану підтримку урядом у формуванні потрібної стратегії субсидій.

Щоб глибше вивчити, як держава застосовує інструменти субсидій для стимулювання мешканців до впровадження PV-установок, необхідно проаналізувати сценарії, за яких мешканці приймають рішення про такі впровадження. Внаслідок значних відмінностей в регіональних ресурсах сонячної радіації та динамічного розвитку місцевих ринків існує висока неоднорідність інвестицій у PV-установки серед різних регіонів. Оскільки ця неоднорідність створює складні та різноманітні виклики до формування урядової стратегії субсидій, то спочатку узагальнимо фактори впливу на впровадження PV-установок мешканцями. Перший фактор – це індивідуальні особливості мешканця, зокрема рівні доходу, освіти й екологічної свідомості особи, ефекти соціального оточення (peer effects). Другий фактор – це технологічні особливості фотоелектричної енергогенерації, які відбиваються витратами та періодами віддачі інвестицій у PV-установки. Третій фактор – це зовнішні особливості, включаючи зовнішні стимули – FIT [15] та субсидії за одиницю

виробленої енергії [16; 17]. Четвертий фактор – це особливості навколишнього природного середовища, які переважно стосуються регіональним показником SRI [15; 18].

Зазначені фактори мають братися до уваги при формуванні державної політики, яка має також враховувати різноманітні та важко вимірювані особистісні характеристики мешканців. Оскільки реалістична мета полягає у започаткуванні загальної політики фінансового стимулювання, спільної для всіх регіонів держави, то така політика має спиратися на вимірювані економічні показники як детермінанти оцінювання впливу на інвестиційну поведінку мешканців. FIT і державна субсидія характеризуються різними цілями та способами застосування.

За швидкого розвитку економіки спільної участі (sharing economy), надання фінансової підтримки і поділ інвестиційних ризиків серед інвесторів у фотоелектричну енергетику (PV-енергетику) стали ключовими засобами сприяння фотоелектричній галузі (PV-галузі). Державна політика стимулювання вважалася ефективним підходом суттєвого просування фотоелектричних систем (PV-систем). Урядові субсидії знижують потребу у великих початкових капіталовкладеннях, а такі ринкові механізми, як пільгові тарифи (feed-in tariffs) і податкові знижки (tax rebates), підвищують віддачу на інвестиції і знижують термін окупності (payback period). Крім того, банківські позики вважаються іншим основним джерелом зовнішнього фінансування для розвитку PV-галузі. Оголошення Бразильського банку розвитку (Brazilian Development Bank; заснований у 1952 р.) про надання кредитів для сонячних PV-проектів за низькими відсотковими ставками позитивно вплинуло на розповсюдження житлових PV-систем.

Фінансування третьою стороною з відповідним розподілом ризиків вважається ефективним підходом для сприяння застосуванням фотоелектричних технологій. Оскільки урядові субсидії створюватимуть тиск на державний бюджет, а банківські позики вимагатимуть взяття банками значних кредитних ризиків, то виникають очевидні бар'єри для підтримки урядами і банками розвитку PV-галузі.

На 2022 р. маловивченими залишаються питання розрахунків таких цільових урядових субсидій і банківських позик з обмеженими кредитними ризиками, що максимізують стимули до поширення PV-технологій. Ефективність урядових субсидій або банківських позик зазвичай визначають за єдиним критерієм. Відома теоретико-ігрова модель Штакельберга для вивчення ролі урядових стратегій для стимулювання PV-технологій [16]. Виявилося, що застосування урядових стратегій стимулювання впровадження PV-обладнання не завжди ефективне: оцінювання ефективності єдиної політики з відновлюваної енергетики в різних регіонах показало важливість регіональних географічних, технічних і соціально-економічних індикаторів. Світовий банк розробив рекомендації надання найкращих позик для просування сонячних PV-технологій у країнах, що розвиваються [19]. Розроблено динамічну теоретико-ігрову модель аналізу поведінки урядів і банків у процесі фінансування PV-компаній [20]. Загалом держава має підтримувати банківські кредитні установи для стимулювання PV-компаній. Урядові субсидії можуть

знижувати ризики банківських позик на підтримку інвесторів у PV-технології, якщо ці субсидії отримують не інвестори, а банки. Хоча в реальності урядові субсидії та банківські позики часто взаємодіють, підтримуючи інвесторів у PV-технології, така взаємодія залишається малодослідженою.

Важливими питаннями є: чи можуть урядові субсидії та банківські позики суттєво сприяти поширенню PV-установок на різних рівнях розвитку PV-ринку; які еволюційно стійкі стани формуватимуться на різних рівнях розвитку PV-ринку; як обсяги урядових субсидій, частки банківських позик, встановлена інвесторами потужність PV-установок впливатимуть на еволюційні траєкторії всіх сторін PV-ринку і трансформацію різних еволюційно стійких станів. Для цього проводиться чисельне моделювання для вивчення еволюційних траєкторій на різних рівнях розвитку PV-ринку.

Висновки. Основними учасниками розподіленого PV-ринку є уряд, банки та потенційні інвестори

у PV-технології. Уряд регулює цей ринок, встановлюючи прийнятні стратегії стимулювання, щоб спонукати потенційних інвесторів до впровадження PV-обладнання. Основні ресурси зовнішнього фінансування для інвесторів у PV-технології надають банки, які дістають відсотки на свої позики. Банки контролюються (регуляторними штрафами у випадку відмови надавати позики потенційним інвесторам у PV-технології) та стимулюються державою з метою забезпечення позик і фінансового сприяння таким інвесторам. Потенційні інвестори у PV-технології приймають остаточні рішення про впровадження PV-обладнання, виходячи з власних інтересів і можливостей роботи за різноманітних обставин, урядових стратегій стимулювання, стратегій банківських позик. Таким чином, уряд створює стимули для потенційних інвесторів у PV-технології з метою захисту довкілля та збільшення добробуту, а фінансові установи та інвестори розподіляють ризики у конкурентному середовищі.

Список використаних джерел:

1. Горбачук В. М., Шулінок Г. О., Сирку А. А. До вимірювання загальної енергоефективності держав. *Теорія оптимальних рішень*. 2019. С. 110-115.
2. Горбачук В. М., Сирку А. А., Сулейманов С.-Б. Механізми прогнозування цін сучасних енергоринків. *Економічний простір*. 2020. № 159. С. 171-177.
3. Горбачук В. М., Дунаєвський М. С., Сулейманов С.-Б. Аналіз невітлених активів на недосконалих ринках. *Приазовський економічний вісник*, 2020, 4 (21). С. 110-117.
4. Ahonen T. *Battle of Kyiv*. URL: <https://twitter.com/tomiahonen/status/1510276474175115281?fbclid=IwAR2cjdDbfPlvhLLQWioJSn2HxRcMkuNZqvjGxt14soUkw6YKIEHM4czXyQ> (дата звернення: 02.04.2022).
5. War in the region. A. Demirgüç-Kunt (ed.) *World Bank ECA Economic Update*. 2022. Spring. 103 p.
6. Горбачук В. М., Дунаєвський М. С., Сирку А. А. Сучасні питання генерування та накопичення енергії в енергосистемі України. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2020. Випуск 1 (24). С. 260-268.
7. Norkin V. I., Gaivoronski A. A., Zaslavsky V. A., Knopov P. S. Models of the optimal resource allocation for the critical infrastructure protection. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54. № 5. P. 696-706.
8. Горбачук В. М., Лупей М. І., Дунаєвський М. С. Підходи до резильєнтності критичних інфраструктур. *Science and education for sustainable development*. A. Ostenda, V. Smachylo (eds.) Katowice, Poland : University of Technology, Katowice, 2022. P. 87-95.
9. Горбачук В. М., Тарасова Л. Г. *Аналіз критичних ситуацій техногенної природи, що призводять до аварій і катастроф у різних галузях господарської діяльності*. Київ: Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова АН України, 1993. 28 с. (Препринт / Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова АН України; 93-22).
10. Ermolieva T., Havlik P., Frank S., Kahil T., Balkovic J., Skalsky R., Ermoliev Y., Knopov P. S., Borodina O. M., Gorbachuk V. M. A risk-informed decision-making framework for climate change adaptation through robust land use and irrigation planning. *Sustainability*. 2022, 14. 1430.
11. Haivoronsky O. O., Ermoliev Yu. M., Knopov P. S., Norkin V. I. Mathematical modeling of distributed catastrophic and terrorist risks. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. Vol. 51. № 1. P. 85-95.
12. Горбачук В., Дунаєвський М., Батіг Л. Нова енергетика й економічні зміни. *Економіка. Фінанси. Бізнес. Парадигмальні зрушення в економічній теорії XXI ст.* А. І. Ігнатюк (ред.) Київ : КНУ імені Т. Шевченка, 2021. С. 45-47.
13. Zhu X., Liao B., Yang S. An optimal incentive policy for residential prosumers in Chinese distributed photovoltaic market: a Stackelberg game approach. *Journal of Cleaner Production*. 2021, July. Vol. 308. 127325.
14. Zhu X., Liao B., Yang S., Pardalos P. M. Evolutionary game analysis on government subsidy policy and bank loan strategy in China's distributed photovoltaic market. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. 2021, May. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10472-021-09729-3>.
15. Monarca U., Cassetta E., Pozzi C., Dileo I. Tariff revisions and the impact of variability of solar irradiation on PV policy support: the case of Italy. *Energy Policy*. 2018, August. Vol. 119. P. 307-316.
16. Chen W., Wei P. Socially optimal deployment strategy and incentive policy for solar photovoltaic community microgrid: a case of China. *Energy Policy*. 2018, May. Vol. 116. Issue C. P. 86-94.
17. Mundaca L., Samahita M. What drives home solar PV uptake? Subsidies, peer effects and visibility in Sweden. *Energy Research & Social Science*. 2020, February. Vol. 60. 101319.
18. Kaplan E., Kaplan S. A stochastic simulation model for reliable PV system sizing providing for solar radiation fluctuations. *Applied Energy*. 2012, September. Vol. 97. P. 970-981.
19. Miller D., Hope C. Learning to lend for off-grid solar power: policy lessons from World Bank loans to India, Indonesia, and Sri Lanka. *Energy Policy*. 2000, February. Vol. 28. Issue 2. P. 87-105.
20. Xu L., Zhang Q., Wang K., Shi X. Subsidies, loans, and companies' performance: evidence from China's photovoltaic industry. 2020, February. *Applied Energy*. Vol. 260. 114280.

References:

1. Gorbachuk V. M., Shulinok A. G., Syrku A. A. (2019) Do vymiriuvannya zahalnoi enerhoefektyvnosti derzhav [To measuring economy-wide energy efficiency of countries]. *Teoriia optimalnykh rishen*, pp. 110-115.
2. Gorbachuk V. M., Syrku A. A., Suleimanov S.-B. (2020) Mekhanizmy prohnouzuvannya tsin suchasnykh enerhorynkiv [Price forecasting mechanisms of modern energy markets]. *Ekonomichnyi prostir*, no. 159, pp. 171-177.
3. Gorbachuk V. M., Dunaievskiy M. S., Suleimanov S.-B. (2020) Analiz nevtilenykh aktiviv na nedoskonalykh rynkakh [The analysis of stranded assets on imperfect markets]. *Pryazovskiy ekonomichnyi visnyk*, no. 4 (21), pp. 110-117.
4. Ahonen T. *Battle of Kyiv*. Available at: <https://twitter.com/tomiaahonen/status/1510276474175115281?fbclid=IwAR2cjdDbfpPlvhLLQWioJSn2HxRcMkuNZqvjGxt14soUkw6YKIEHM4czXyQ> (accessed 02 April 2022).
5. War in the region (2022). A. Demirgüç-Kunt (ed.) *World Bank ECA Economic Update*, Spring, 103 p.
6. Gorbachuk V. M., Dunaievskiy M. S., Syrku A. A. (2020) Suchasni pytannia heneruvannya ta nakopychennia enerhii v enerhosystemi Ukrainy [The modern issues of electric energy generation and storage in the power grid of Ukraine]. *Skhidna Yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia*. Vypusk 1 (24), pp. 260-268.
7. Norkin V.I., Gaivoronskiy A. A., Zaslavsky V. A., Knopov P. S. (2018) Models of the optimal resource allocation for the critical infrastructure protection. *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, no. 5, pp. 696-706.
8. Gorbachuk V. M., Lupey M. I., Dunaievskiy M. S. (2022) Pidkhody do rezylentnosti krytychnykh infrastruktur [Approaches to critical infrastructure resilience]. *Science and education for sustainable development*. A. Ostenda, V. Smachylo (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, pp. 87-95.
9. Gorbachuk V.M., Tarasova L.H. (1993) *Analiz krytychnykh sytuatsii tekhnohennoi pryrody, shcho pryzvodiats do avarii i katastrof u riznykh haluziakh hospodarskoi diialnosti* [Analysis of critical situations of man-made nature, leading to accidents and catastrophes in various sectors of economic activity]. Kyiv: In-t kibepnetyky im. V. M. Glushkova AN Ukrainy, 28 p. (Ppepynt / In-t kibepnetyky im. V. M. Glushkova AN Ukrainy).
10. Ermolieva T., Havlik P., Frank S., Kahil T., Balkovic J., Skalsky R., Ermoliev Y., Knopov P.S., Borodina O.M., Gorbachuk V.M. (2022) A risk-informed decision-making framework for climate change adaptation through robust land use and irrigation planning. *Sustainability*, no. 14, p. 1430.
11. Haivoronskyi O. O., Ermoliev Yu. M., Knopov P. S., Norkin V. I. (2015) Mathematical modeling of distributed catastrophic and terrorist risks. *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 51, no. 1, pp. 85-95.
12. Gorbachuk V. M., Dunaievskiy M. S., Batih L. O. (2021) Nova enerhetyka y ekonomichni zminy [New energy and economic change]. *Ekonomika. Finansy. Biznes. Paradyhmalni zrushennia v ekonomichnii teorii XXI st.* A. I. Ihnatiuk (red.) Kyiv: KNU imeni T.Shevchenka, pp. 45-47.
13. Zhu X., Liao B., Yang S. (2021) An optimal incentive policy for residential prosumers in Chinese distributed photovoltaic market: a Stackelberg game approach. *Journal of Cleaner Production*, July, vol. 308, p. 127325.
14. Zhu X., Liao B., Yang S., Pardalos P.M. (2021) Evolutionary game analysis on government subsidy policy and bank loan strategy in China's distributed photovoltaic market. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, May. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10472-021-09729-3>.
15. Monarca U., Cassetta E., Pozzi C., Dileo I. (2018) Tariff revisions and the impact of variability of solar irradiation on PV policy support: the case of Italy. *Energy Policy*, August, vol. 119, pp. 307-316.
16. Chen W., Wei P. (2018) Socially optimal deployment strategy and incentive policy for solar photovoltaic community microgrid: a case of China. *Energy Policy*, May, vol. 116, Issue C, pp. 86-94.
17. Mundaca L., Samahita M. (2020) What drives home solar PV uptake? Subsidies, peer effects and visibility in Sweden. *Energy Research & Social Science*, February, vol. 60, p. 101319.
18. Kaplani E., Kaplanis S. (2012) A stochastic simulation model for reliable PV system sizing providing for solar radiation fluctuations. *Applied Energy*, September, vol. 97, pp. 970-981.
19. Miller D., Hope C. (2000) Learning to lend for off-grid solar power: policy lessons from World Bank loans to India, Indonesia, and Sri Lanka. *Energy Policy*, February, vol. 28, Issue 2, pp. 87-105.
20. Xu L., Zhang Q., Wang K., Shi X. (2020) Subsidies, loans, and companies' performance: evidence from China's photovoltaic industry, February. *Applied Energy*, vol. 260, p. 114280.