



*CENTRUM STUDIÓW UKRAIŃSKICH SZKOŁY
GŁÓWNEJ HANDLOWEJ W WARSZAWIE
BADANIE ANALITYCZNE NR WP2024/05PL*

**POTENCJAŁ STRATEGICZNY
MIKROSIECI ENERGII ODNAWIALNEJ:
GLOBALNE PRZEMIANY
I UWARUNKOWANIA
ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU**

**Volodymyr Lypov¹,
Natalia Ushenko², Viktoriia Hurochkina³,
Tomasz Szapiro⁴, Larysa Shaulska⁵**

2024

¹ Instytut Ekonomii i Prognozowania Narodowej Akademii Nauk Ukrainy (Ukraina), lypov_vl@ukr.net.

² Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University (Ukraina), ushenko_nv@ukr.net.

³ Szkoła Główna Handlowa w Warszawie i Uniwersytet Zielonogórski (Polska), Kyiv Institute of Business and Technology (Ukraina), viktoriia.hurochkina@sgh.waw.pl, viktoriv2005@ukr.net.

⁴ Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Polska), tszapiro@sgh.waw.pl.

⁵ Kijowski Uniwersytet Narodowy im. Tarasa Szewczenki (Ukraina), shaulska@knu.ua.

CSUkr - Opracowania Analityczne

Seria empirycznych i analitycznych opracowań naukowych Centrum Studiów Ukraińskich w Szkole Głównej Handlowej w Warszawie (CSUkr SGH) dokumentuje badania współpracowników w Polsce i poza jej granicami. Celem badań jest wiedza ekspercka i praktyczne rozwiązania budowane dzięki pogłębianiu rozumienia współczesnych procesów społeczno-ekonomicznych. W szczególności celem Centrum jest wspieranie rozwoju więzi naukowych pomiędzy Ukrainą i Polską w kontekście odbudowy Ukrainy i jej współpracy z krajami Unii Europejskiej i jej partnerami. Badania te dotyczą problemów migracji, zmian społeczno-ekonomicznych, współpracy naukowej oraz rozwoju innowacji, a także integracji Ukrainy z Europejską Przestrzenią Badawczą. Podejmowane tematy mają wpływ na jakość edukacji, kształtowanie przyszłych liderów oraz ich gotowość do sprostania globalnym wyzwaniom. Centrum CSUkr SGH zaprasza do współpracy badaniach, w wymianie wiedzy i naukowej współpracy naukowców, ekspertów, studentów oraz przedstawicieli gospodarki zainteresowanych rozwojem projektów badawczych i ich zastosowań.

The series of empirical and analytical scientific studies conducted by the Center for Ukrainian Studies at the Warsaw School of Economics (CSUkr SGH) documents research collaborations involving authors from Poland and other countries. The aim of these studies is to integrate expert knowledge with practical solutions, grounded in a deep understanding of contemporary socio-economic processes. Specifically, CSUkr SGH focuses its efforts on fostering the development of academic connections between Ukraine and Poland in the context of Ukraine's reconstruction and its cooperation with the European Union and other international partners. The research topics cover issues such as migration, socio-economic transformations, scientific cooperation, innovation development, and Ukraine's integration into the European Research Area. The discussed themes have a direct impact on the quality of education, the formation of future leaders, and their preparedness to address global challenges. The CSUkr SGH invites academics, experts, higher education students, and business representatives to collaborate on research projects, their practical applications, knowledge exchange, and the advancement of scientific partnerships.

Серія емпіричних та аналітичних наукових досліджень Центру українських студій Варшавської школи економіки (CSUkr SGH) документує наукові роботи співавторів із Польщі та інших країн. Метою досліджень є поєднання експертних знань із практичними рішеннями, заснованими на поглибленому розумінні сучасних соціально-економічних процесів. Зокрема, CSUkr SGH спрямовує свої зусилля на підтримку розвитку наукових зв'язків між Україною та Польщею у контексті відбудови України та її співпраці з країнами Європейського Союзу та іншими міжнародними партнерами. Тематика досліджень охоплює питання міграції, соціально-економічних змін, наукової співпраці та розвитку інновацій, а також інтеграції України до Європейського дослідницького простору. Обговорювані теми безпосередньо впливають на якість освіти, формування майбутніх лідерів та їхню готовність долати глобальні виклики. Центр CSUkr SGH запрошує до співпраці науковців, експертів, здобувачів вищої освіти та представників бізнесу, зацікавлених у розробці дослідницьких проєктів і їх практичному застосуванні, а також у обміні знаннями та розвитку наукової співпраці.

OPRACOWANIE GRAFICZNE

Anna Altuhova

Centrum Studiów Ukraińskich w SGH
Szkola Główna Handlowa w Warszawie

POTENCJAŁ STRATEGICZNY MIKROSIECI ENERGETYKI ODNAWIALNEJ: GLOBALNE TRANSFORMACJE I UWARUNKOWANIA ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU

Volodymyr Lypov, Instytut Ekonomii i Prognozowania NAS Ukrainy (Ukraina).
Natalia Ushenko, Borys Grinchenko, Kijowski Uniwersytet Metropolitalny (Ukraina).
Viktoriia Hurochkina, Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, Uniwersytet
Zielonogórski (Polska), Kyiv Institute of Business and Technology (Ukraina).
Tomasz Szapiro, Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, Warszawa, (Polska).
Larysa Shaulska, Kijowski Uniwersytet Narodowy im. Tarasa Szewczenki (Ukraina).

ABSTRAKT

W opracowaniu przedstawiono wyniki badania, którego celem było określenie strategicznego potencjału wdrożenia technologii cyfryzacji w produkcji energii odnawialnej, poprzez tworzenia mikrosieci energii odnawialnej oraz wpływu takiej technologii na procesy ewolucyjnej globalizacji. Energia odnawialna jest kluczowym elementem zapewnienia zrównoważonego rozwoju. Różnorodność alternatywnych źródeł energii oraz duża liczba producentów zdolnych do oferowania energii elektrycznej podkreślają potrzebę tworzenia małych mikrosieci energetycznych. Rozważany w opracowaniu model biznesowy inteligentnych sieci może stymulować restrukturyzację systemu produkcji oraz rynków dystrybucji energii elektrycznej. W badaniu przeprowadzono analizę strukturalną, funkcjonalną, systemową oraz instytucjonalną. Omówiono cechy platform cyfrowych jako formy organizacyjnej. Platformy te zapewniają efekt synergii łącząc małych producentów energii odnawialnej w mikrosieci, co prowadzi do modelu dwusektorowego dla przemysłu energetycznego. Analizowany jest mechanizm budowania systemów energetycznych opartych na zasadach "Przemysłu 5.0" oraz aspektach przyspieszania globalnych celów zrównoważonego rozwoju.

SPIS

1	Wprowadzenie.....	3
2	Przegląd literatury	6
2.1	Rozwój energetyki odnawialnej na świecie w literaturze	6
2.2	Rozwój energetyki odnawialnej na Ukrainie.....	10
3	Platformy cyfrowe i mikrosieci OZE	15
3.1	Mikrosieci OZE	16
3.2	„Przemysł 5.0” - model rozwoju mikrosieci OZE.....	18
3.3	Ekosystem mikrosieci a przyspieszenie zrównoważonego rozwoju	20
4	Globalizacyjny kontekst rozwoju mikrosieci OZE.....	26
5	Uwagi końcowe	30
6	Bibliografia	33
7	Streszczenia.....	39

1 Wprowadzenie

Celem badania jest określenie strategicznego potencjału wdrożenia technologii cyfryzacji oraz odnawialnych źródeł energii (OZE), tworzenia mikro-sieci OZE i ich wpływu na procesy ewolucyjne globalizacji. Analiza obejmuje wpływ tych procesów na gospodarkę, środowisko oraz globalne rynki energetyczne, a także rolę cyfryzacji w optymalizacji sektora energetycznego. Zwrócono uwagę na znaczenie zrównoważonego rozwoju, cele z nim związane oraz sposoby wdrażania nowych technologii energetycznych, szczególnie w kontekście wyzwań i zagrożeń, takich jak konflikty zbrojne. Pogłębienie procesów globalizacyjnych prowadzi do rozpowszechniania światowych koncepcji cywilizacyjnych i zmiany oczekiwań interesariuszy w systemach krajowych. To z kolei wymaga transformacyjnych zmian w funkcjonowaniu rynku energetycznego oraz aktywizacji wdrażania technologii cyfrowych, które wpływają praktycznie na wszystkie aspekty życia ludzkiego. Jest to szczególnie istotne, gdy te zmiany dotyczą gałęzi gospodarki o kluczowym znaczeniu. Najważniejszym z nich jest produkcja energii elektrycznej.

Sektor energetyczny odgrywa kluczową rolę w życiu społecznym. Zapewnia wzrost poziomu życia społeczeństwa, umożliwiając funkcjonowanie licznych maszyn, urządzeń mechanicznych oraz innych przyrządów. Jednocześnie, sektor energetyczny jest największym konsumentem zasobów nieodnawialnych i źródłem zanieczyszczeń środowiska. W związku z tym, zrównoważony rozwój poszczególnych krajów oraz ludzkości w całości w dużej mierze zależy od zdolności do rozwiązania tych sprzecznych zadań. Zwiększenie poziomu zaspokajania potrzeb człowieka powinno odbywać się równocześnie z ograniczeniem negatywnych skutków intensyfikacji wykorzystywania tych zasobów.

W tym kontekście cyfryzacja sektora energetycznego bezpośrednio przyczynia się do realizacji wielu celów zrównoważonego rozwoju. Należą do nich następujące cele: *SDG 7* czysta i dostępna energia; *SDG 9* budować stabilną infrastrukturę, promować zrównoważone uprzemysłowienie oraz wspierać innowacyjność; *SDG 11* uczynić miasta i osiedla ludzkie bezpiecznymi, stabilnymi, zrównoważonymi oraz sprzyjającymi włączeniu społecznemu; *SDG 12* zapewnić wzorce zrównoważonej konsumpcji i produkcji.

Cele, które są pośrednio związane z tym procesem, obejmują: *SDG 8* promować stabilny, zrównoważony i inkluzywny wzrost gospodarczy, pełne i produktywne zatrudnienie oraz godną pracę dla wszystkich ludzi; *SDG 13* podjąć pilne działania w celu przeciwdziałania zmianom klimatu i ich skutkom; *SDG 14* chronić oceany, morza i zasoby morskie oraz wykorzystywać je w sposób zrównoważony; *SDG 15* chronić, przywrócić oraz

promować zrównoważone użytkowanie ekosystemów lądowych, zrównoważone gospodarowanie lasami, zwalczać pustynnienie, powstrzymać i odwracać proces degradacji gleby oraz powstrzymać utratę różnorodności biologicznej, por. „Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030”, (2015).

Cyfrowe platformy oraz alternatywne źródła odnawialnej energii otwierają nowe perspektywy dla branży. Zwiększenie mocy oraz sprawności energetycznej wiąże się ze zmniejszeniem negatywnych emisji ekologicznych. Optymalizowana jest działalność całego kompleksu przedsiębiorstw zapewniających generację, akumulację energii elektrycznej oraz jej dystrybucję. Tworzą się możliwości przewyciężenia naturalnych monopolii na rynkach produkcji, przesyłu, dystrybucji oraz sprzedaży detalicznej energii elektrycznej. Otwarte zostają perspektywy głębszej dywersyfikacji rynków hurtowych i detalicznych. To prowadzi do wzrostu liczby potencjalnych uczestników rynku. Otwierają się możliwości przejścia od hierarchicznej zintegrowanej organizacji do dwusektorowego modelu. W nim tradycyjna struktura zostaje uzupełniona o lokalne mikro-sieci, które łączą zarówno zwykłych konsumentów energii, jak i gospodarstwa domowe, małe i średnie przedsiębiorstwa, które mogą samodzielnie produkować i oferować nadmiar energii elektrycznej. W ten sposób tworzą się podstawy do transformacji konkurencyjnych relacji na rynkach lokalnych i globalnych.

Cyfryzacja sektora energetycznego jest szczególnie ważna w obliczu agresji militarnej ze strony Rosji. Wydarzenia jesieni 2022 roku pokazały znaczenie koordynacji całego kompleksu branżowych przedsiębiorstw w procesie operacyjnego reagowania na wyzwania oraz tworzenia infrastruktury energetycznej kraju. W tych warunkach bada się możliwości, które zapewniają wdrożenie technologii informacyjnych oraz rozwój cyfrowych platform, por. Hrytsenko i Lypov (2020), w celu zapewnienia zrównoważonego rozwoju i przewyciężenia zagrożeń związanych z niepewnością i niestabilnością funkcjonowania systemu energetycznego w czasie wojny.

Opracowanie składa się z czterech rozdziałów. Wprowadzenie aktualizuje temat badania i nakreśla bieżące tendencje, następnie w Rozdziale 2 przedstawiony jest przegląd teoretyczny transformacji sektora energetycznego za pomocą cyfryzacji i odnawialnych źródeł energii. Obejmuje to analizę celów zrównoważonego rozwoju oraz wpływu cyfrowych platform na produkcję i dystrybucję energii elektrycznej, a także opisano cechy i zalety alternatywnej energetyki.

W Rozdziale 3 omówiono wpływ cyfrowych platform i mikro-sieci odnawialnej energii na transformację globalnych i lokalnych systemów energetycznych, skierowanych na

przejście od modeli scentralizowanych do zdecentralizowanych. Rozważane są możliwości zwiększenia efektywności energetycznej oraz zmniejszenia kosztów dzięki technologiom, które umożliwiają łączenie producentów i konsumentów w interaktywne platformy do zrównoważonego wykorzystania zasobów odnawialnych. Przedstawiony wpływ cyfrowych platform oraz mikro-sieci odnawialnej energii (OZE) na przebudowę sektora energetycznego w kontekście koncepcji „Przemysł 5.0”. Badano, jak te platformy, łącząc generację, magazynowanie i dystrybucję energii za pomocą sztucznej inteligencji, Internetu Rzeczy i aplikacji wykorzystujących algorytmy blockchain, tworzą systemy cyber-fizyczne i wspierają zdecentralizowaną energetykę. Przyczyniają się one do zwiększenia odporności i jakości życia społeczności lokalnych, jednocześnie integrując się z globalnymi sieciami energetycznymi, aby osiągnąć zrównoważony rozwój i stabilność gospodarczą.

Rozdział 4 przedstawia koncepcję inteligentnych sieci (ang. *Smart Grid*), modernizujących system elektroenergetyczny poprzez wykorzystanie innowacyjnych technologii, takich jak technologie informacyjne i telekomunikacyjne. W Rozdziale 5. przedstawiono szczegóły ekosystemu inteligentnych sieci, ich elastyczności, automatyzacji i stabilności sieci, które osiągane są dzięki konwergencji mikro-sieci i lokalnych producentów energii z odnawialnych źródeł. Rozważane są mikro-sieci (mikrosieci), które umożliwiają efektywne wykorzystanie rozproszonych zasobów energetycznych (DER), takich jak panele słoneczne, akumulatory domowe i inne OZE. W Rozdziale autorzy przedstawiają szczegóły formowania mikro-sieci opartych na OZE, które zmniejszają zależność od paliw kopalnych i scentralizowanych systemów energetycznych oraz przyczyniają się do demokratyzacji stosunków energetycznych. Podkreślono orientację mikro-sieci na lokalne potrzeby oraz ich ukierunkowanie na strategiczny rozwój globalnych rynków energetycznych, zmieniając tym samym równowagę wpływów gospodarczych między krajami. Opracowanie zamykają Uwagi końcowe, Bibliografia i Streszczenia w języku ukraińskim i angielskim.

2 Przegląd literatury

Niniejszy rozdział składa się z dwóch podrozdziałów. W podrozdziale 2.1 przedstawiono przegląd literatury dotyczący procesów i trendów globalnego wzrostu odnawialnej energetyki, w szczególności w Ukrainie, który odzwierciedla dążenie do bezpieczeństwa energetycznego i zrównoważonego rozwoju. Jednocześnie ryzyko inwestycyjne i niestabilność polityczna pozostają znacznymi przeszkodami w rozwoju odnawialnej energetyki. W podrozdziale 2.2 zaprezentowano przegląd danych statystycznych, które dowodzą, że Ukraina aktywnie rozwija odnawialną energetykę, dążąc do zwiększenia mocy do 30 GW (gigawatów) do 2030 roku, jednak napotyka trudności finansowe oraz rosnące ryzyko, szczególnie w wyniku agresji militarnej Rosji wobec Ukrainy.

2.1 Rozwój energetyki odnawialnej na świecie w literaturze

Już na początku nowego millennium Rochet i Tirole (2003) zwrócili uwagę na formowanie rynków o dwustronnej charakterystyce na skutek wykorzystania modelu platform biznesowych. Uznanie roli cyfrowych platform jako innowacyjnej formy instytucjonalnej i modelu biznesowego uzasadniają Parkera *i in.* (2016). Na redukcję kosztów transakcyjnych, będącą kluczową cechą modelu platformowego wskazuje Munger (2018).

Jednocześnie zachodzą istotne zmiany w obszarze produkcji energii elektrycznej, por. Rui *i in.* (2022). Rozwój alternatywnej energetyki opartej na odnawialnych źródłach stworzył możliwość przejścia do tzw. „małej energii” w ramach prywatnych gospodarstw domowych, por. Fehrenbacher (2017). Kolejnym krokiem w tej sferze jest tworzenie mikrosieci do produkcji i dystrybucji energii elektrycznej. Hossain *i in.* (2016) badają rolę technologii informacyjnych i komunikacyjnych w rozwoju sieciowej energetyki odnawialnej. Zgodnie z danymi Jenkins *i in.* (2015), umożliwiają one inteligentną ocenę (inteligentne pomiary) opcji planowania i organizowania pracy sieciowej. Olivella-Rosell *i in.* (2018) proponują model dla inteligentnych platform dostawców usług energetycznych. Wykorzystanie modelu platformowego otwiera drogę do zapewnienia interakcji między dostawcami. Kiesling (2016) oraz Tabors (2017) koncentrują się na badaniu specyfiki organizacji tego procesu.

Breuer (2017) bada wpływ integracji technologii cyfrowych na decentralizację energetyki oraz rolę mikrosieci w zapewnianiu elastyczności i stabilności systemów energetycznych. Autor podkreśla, że rozwój mikrosieci wspieranych przez platformy cyfrowe umożliwia nie tylko zwiększenie efektywności energetycznej, ale także demokratyzację dostępu do energii i wzmocnienie roli lokalnych społeczności w produkcji i konsumpcji energii elektrycznej. W szczególności Breuer analizuje potencjał mikrosieci w kontekście

zrównoważonego rozwoju oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych, co wpisuje się w globalne cele transformacji energetycznej.

Literatura naukowa dowodzi rosnącego zrozumienie rynkowego potencjału modelu platform interakcji w obszarze produkcji i dystrybucji energii elektrycznej, por. Srnicek (2017). Ważnym elementem zapewnienia efektywności energetycznych mikrosieci jest możliwość magazynowania i dalszego redystrybucji czasowych nadmiarów generowanej energii. Aspekty ekonomiczne i polityczne tego procesu znajdują się w centrum badań Timilsiny *i in.* (2012). Parag i Sovacool (2016) podkreślają kluczową rolę w zachodzących zmianach możliwości połączenia gospodarstw domowych w ramach platformowych ekosystemów pozycji rynkowych producentów i konsumentów energii elektrycznej oraz wejście tego rynku w erę prokonsumpcjonizmu. Istotnym aspektem tego procesu jest krajowa polityka gospodarcza w obszarze wymiany międzynarodowej uwzględniająca kontekst bezpieczeństwa ekonomicznego, por. Hurochkina *i in.* (2021, 2024). Z kolei T. Morstyn *i in.* (2018) i Matviienko *i in.* (2024) badają wpływ interakcji małych mikroekonomicznych producentów energii elektrycznej na transformację krajowego systemu produkcji energii.

Próby globalnej oceny ekonomicznego rozwoju energii słonecznej w gospodarstwach domowych podjęli Lang *i in.* (2015). Podobne wyniki analiz rynku USA przedstawiło Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnej (National Renewable Energy Lab., NREL), por. Fu *i in.* (2017). Efekty synergii tworzenia struktur sieciowych, które łączą odnawialne źródła energii w krajach globalnego Południa oraz Niemczech, omawiają Kirchhoff *i in.* (2016). Korzyści i problemy wynikające z rozwoju prokonsumpcjonizmu w energetyce w Niemczech są badane przez Schill *i in.* (2017). Kwan (2017) bada wpływ specyfiki środowiska ekonomicznego na organizację sieci terytorialnego rozdziału energii elektrycznej wytwarzanej przez prywatne instalacje fotowoltaiczne. Z kolei Camilo *i in.* (2017) koncentruje się na badaniu ekonomicznej zasadności rozwoju energii słonecznej w gospodarstwach domowych w Portugalii. Kompleksowe badanie doświadczeń wielu krajów świata w zakresie rozwoju energii odnawialnej oraz perspektywicznych kierunków rozwoju zielonej energetyki przedstawili Korohodova *i in.* (2022).

Literatura naukowa odnotowuje także kwestie stymulowania rozwoju prywatnej produkcji energii. Ważne wyniki w tym obszarze otrzymali Abdmouleh *i in.* (2015). Koncentrują się oni na badaniu najlepszych praktyk stymulowania integracji w branży energetyki odnawialnej. Natomiast Borenstein (2017) bada wpływ takich narzędzi, jak taryfy i ulgi podatkowe. Z kolei autor Eid *i in.* (2014) badają możliwości zastosowania praktyk

rekompensowania kosztów sieciowych oraz subsydiowania krzyżowego. Hagerman *i in.* (2016) oraz Lang *i in.* (2016) badają możliwości małej sieciowej energetyki elektrycznej bez wsparcia ze strony państwa. Specyfikę konkurencji jako bodźca do rozwoju sieciowej energetyki omawiają prace Comello i Reichelsteina (2017).

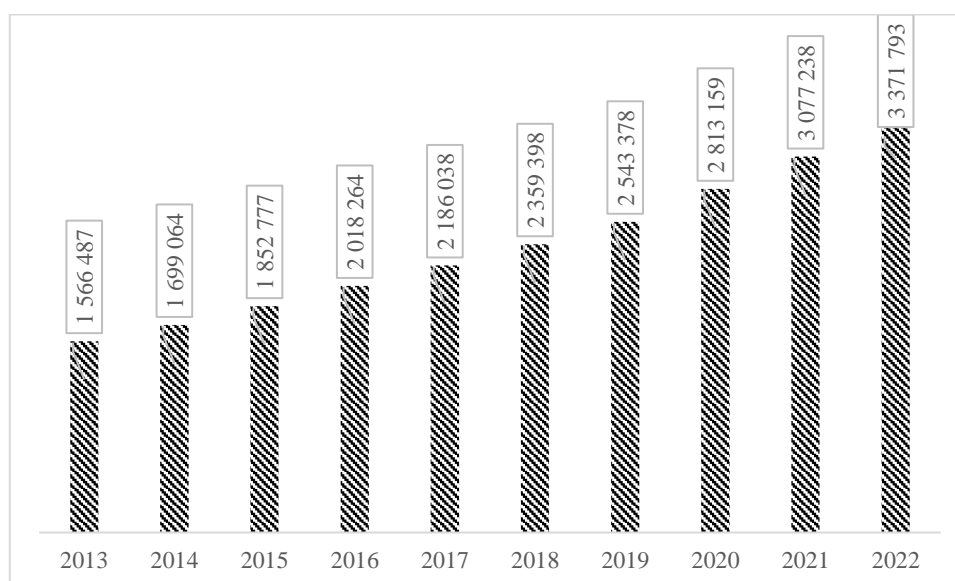
Rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) na całym świecie skierował uwagę na problematykę bezpieczeństwa energetycznego, odporności oraz łagodzenia zmian klimatycznych, co jest podkreślane przez Sewostyanova i Shaforosta (2024) i Shaulska *i in.* (2021). Przewiduje się, że moc OZE wzrośnie znacząco, z rekordowym wzrostem o 320 GW zaplanowanym na rok 2022, co rozważali Trunina *i in.* (2022). Przejście do OZE jest możliwe dzięki czynnikom takim jak postęp technologiczny, obniżenie kosztów i zwiększenie efektywności, co wskazują Karabegović i Dolecek (2015), Karabegović (2021). Karbovska *i in.* (2021) podkreślają, że wprowadzenie OZE sprzyja zmniejszeniu zależności od paliw kopalnych, zwiększeniu bezpieczeństwa energetycznego oraz wspiera zrównoważony rozwój. Takie kraje jak Islandia, Kenia i Łotwa są liderami w produkcji energii elektrycznej z OZE, inne kraje, jak Ukraina i Wielka Brytania, wykazują szybki wzrost, na co wskazuje Karbovska *i in.* (2021). Inwestycje w technologie OZE również doprowadziły do zwiększenia możliwości zatrudnienia na całym świecie. Klepacka (2019) odnotowuje, że promowanie źródeł OZE jest zgodne z celami zrównoważonego rozwoju i wymaga stałego wsparcia oraz szkoleń. Dlatego dla skutecznego wdrażania i rozwoju odnawialnych źródeł energii konieczne są podejścia kompleksowe, obejmujące wsparcie rządowe, pozyskiwanie inwestycji, rozwój programów edukacyjnych oraz technicznej infrastruktury. Takie systemowe podejście pomoże przyspieszyć przejście do trwałych modeli energetycznych, zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych i osiągnąć niezależność energetyczną, co jest ważne dla krajów z wysoką zależnością od importu nośników energii, takich jak Ukraina.

Ukraina ma znaczny potencjał w tym sektorze i znajduje się wśród pierwszej 20 krajów atrakcyjnych dla inwestycji w odnawialną energetykę, czego dowodzą Woronin i Panasiuk (2022). Rynek odnawialnej energetyki w kraju wykazuje wzrost, w tym energii słonecznej, wiatrowej i wodnej, jak podają Pecheniuk *i in.* (2022). Niemniej, inwestycje takie niosą też wyzwania, w tym ryzyko inwestycyjne spowodowane niestabilnością polityczną i niepewnością prawną, jak wskazuje Yakubiv *i in.* (2019) oraz Kharlamova *i in.* (2016). Popyt na odnawialną energię i gotowość do jej wdrożenia, jak wskazują Kuzior *i in.* (2021). Jest w Ukrainie wysoki. Dlatego w literaturze rekomenduje się wprowadzenie polityki wsparcia, przyciągnięcie inwestycji i doskonalenie praktyki zarządzania energią w celu uruchomienia

dalszego rozwoju tego sektora w Ukrainie, por. Klopov (2015), Denysiuk *i in.* (2023). Trwająca wojna z Rosją miała wpływ na sektor odnawialnej energii, który wymaga skupienia uwagi na odbudowie i rozwoju po wojnie. Jednakże, ogólnie rzecz biorąc, odnawialna energia w Ukrainie ma znaczący potencjał i perspektywy dalszego wzrostu, jednak jej realizacja wymaga strategicznych działań, takich jak tworzenie korzystnych warunków dla inwestorów, zapewnienie stabilności ram prawnych i przewyższenie istniejącego ryzyka. Pomimo wyzwań związanych z wojną i niestabilnością polityczną, istniejący popyt na ekologiczną energię wśród społeczeństwa wskazuje na gotowość kraju do zmian. W okresie po wojnie Ukraina ma możliwość nie tylko odbudowy infrastruktury, ale i jej transformacji zgodnie z nowoczesnymi standardami zrównoważonego rozwoju, wzmacniając swoje bezpieczeństwo energetyczne i niezależność.

Analiza globalnych tendencji wzrostu mocy odnawialnych źródeł energii w latach 2013-2022 pokazuje znaczący i ciągły wzrost na całym świecie. Dane, jak pokazano na Rysunku 2.1, pokazują wzrost całkowitej mocy odnawialnej energii ponad dwukrotnie, z 1 566 487 MW w 2013 roku do 3 371 793 MW w 2022 roku.

Energia odnawialna ogółem



Źr.: opr. wł.

Rysunek 2.1. *Dynamika wskaźników wykorzystania energii odnawialnej na świecie, która charakteryzuje rosnącą uwagę współczesnego świata na energię odnawialnej, pokazuje stopniowy, ale stabilny wzrost zarówno w skali globalnej produkcji energii, jak i w rozwoju technologii oraz infrastruktury do wdrażania tych źródeł energii.*

Na rysunku 2.1 przedstawiono tendencje dynamiki wzrostu mocy energii odnawialnej na świecie. Energia odnawialna jest aktywnie wdrażana w wielu krajach dzięki obniżeniu kosztów

technologii, wsparciu ze strony rządów oraz zwiększeniu świadomości znaczenia ekologicznej trwałości i bezpieczeństwa systemów energetycznych. Stało się to głównym czynnikiem stopniowego zmniejszania zależności od tradycyjnych źródeł energii, takich jak węgiel i ropa, oraz przeorientowania na energię słoneczną, wiatrową, wodną i inne źródła odnawialne.

Ten wzrost wykorzystania energii odnawialnej odzwierciedla silne globalne dążenie do czystszych, bardziej zrównoważonych rozwiązań energetycznych, które są stymulowane przez takie czynniki, jak postęp technologiczny, obniżenie kosztów oraz światowy nacisk na bezpieczeństwo energetyczne, odporność na zmiany klimatyczne i redukcję emisji gazów cieplarnianych. Ta tendencja podkreśla zbiorowe międzynarodowe zaangażowanie w energię odnawialną, kładąc nacisk na znaczenie dalszego wspierania polityki, inwestycji oraz edukacji technicznej w tym sektorze w celu przyspieszenia przejścia do modeli zrównoważonej energii, co jest kluczowe dla krajów silnie zależnych od importu energii, takich jak Ukraina.

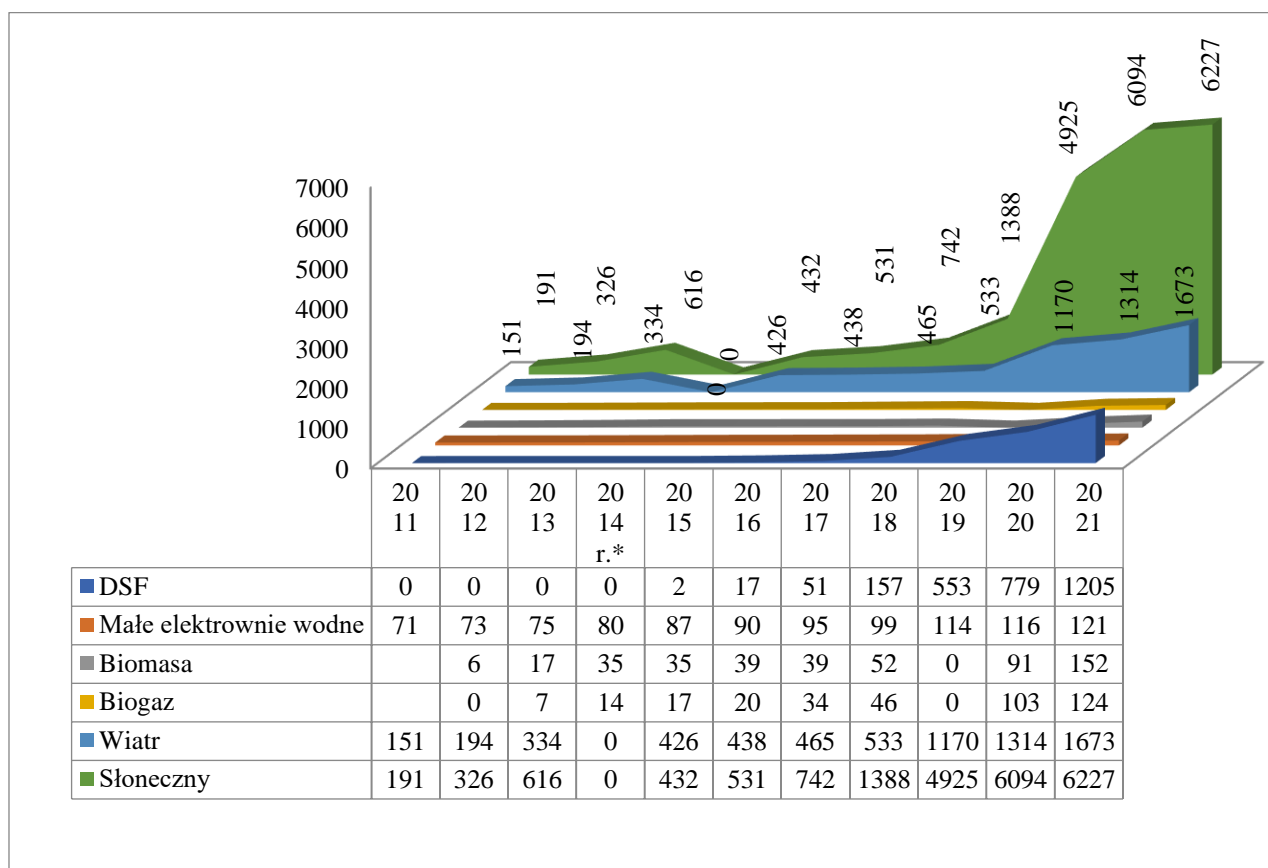
2.2 Rozwój energetyki odnawialnej na Ukrainie

Na Światowym Forum Ekonomicznym w Davos 24 maja 2022 roku zaprezentowano projekt zwiększenia mocy odnawialnej energii w Ukrainie do 2030 roku z 9 do 30 GW, por. Trotsenko (2022). Jest to zgodne z globalnymi trendami wspierającymi OZE dla bezpieczeństwa energetycznego i zrównoważonego rozwoju, jak zauważają autorzy prac naukowych Trunina *i in.* (2022), Zacharii i Kovalchuka (2021). Wielu autorów popiera takie stanowisko w odniesieniu do wysiłków kraju na rzecz dostosowania się do globalnych i europejskich inicjatyw, takich jak REPowerEU, które mają na celu dywersyfikację źródeł energii i zmniejszenie zależności od paliw kopalnych, por. Denysiuk *i in.* (2023), Hurochkina i Kohut (2024). Podstawy prawne i organizacyjne realizacji tego projektu zostały określone w Ustawie Ukrainy „O alternatywnych źródłach energii”, uchwalonej przez Parlament Ukrainy w grudniu 2003 roku. Ustawa ta określa prawne, ekonomiczne, ekologiczne i organizacyjne zasady wykorzystania alternatywnych źródeł energii oraz wspieranie ich rozwoju w sektorze paliwowo-energetycznym (2003). Dane przedstawione na rysunku 2.2 wskazują na potencjał rozwoju odnawialnej energii w Ukrainie i osiągnięte sukcesy w tym zakresie.

W rozwój energetyki ze źródeł odnawialnych wzrost zaangażowane są duże firmy energetyczne, małe i średnie przedsiębiorstwa oraz gospodarstwa domowe. Wzrost produkcji energii elektrycznej w gospodarstwach domowych korzystających z paneli słonecznych w 2020 i 2021 roku wyniósł odpowiednio 40,9% i 54,7%. W tym samym okresie produkcja energii z wykorzystaniem biomasy przez małe gospodarstwa rolne wzrosła o 62,8% i 67,0%.

Całkowita liczba domowych systemów fotowoltaicznych (DSF) na koniec 2021 roku wynosiła 44 888 jednostek, łączna zainstalowana moc – 1 205 MW, a wartość sprzedanej energii elektrycznej po „zielonej” taryfie wyniosła 1 094 mln kWh (State Agency, 2022). Jednocześnie potencjał rozwoju odnawialnych źródeł energii na Ukrainie nie jest wykorzystywany w pełni. Do czynników ograniczających rozwój należą ograniczone zasoby finansowe, niewystarczająca rentowność inwestycji oraz zwiększone ryzyko związane ze znaczną zależnością od warunków pogodowych. Warto również zauważyć, że ryzyko inwestycyjne wzrosło w wyniku agresji wojskowej Rosji. Innym efektem tego jest pojawienie się problemów z realizacją „zielonych” taryf.

Rozwój energetyki odnawialnej na Ukrainie w latach 2011-2021⁶, (megawaty)



Źr.: Obl. wł. na podst. Energia (2022).

Rysunek 2.2. Uformowane dane charakteryzują tendencję wzrostu całkowitej zainstalowanej mocy odnawialnych źródeł energii w Ukrainie w latach 2011-2021.

Na rysunku 2.2 przedstawiono tendencje dynamiki odnawialnych źródeł energii w Ukrainie. Szczególnie wysoki wzrost wykazały energia słoneczna oraz elektrownie wiatrowe,

⁶ Do 2014 r., z uwzględnieniem mocy zlokalizowanych w Autonomicznej Republice Krymu oraz okupowanych częściach obwodów ługańskiego i donieckiego (łącznie 633,7 MW).

gdzie moc zwiększyła się wielokrotnie, szczególnie po 2018 roku. Inne źródła, takie jak biomasa, biogaz oraz małe elektrownie wodne, również wykazują stopniowy wzrost, ale w mniejszym tempie. Ogólny trend wskazuje na wzrost zainteresowania i inwestycji w ten sektor, co odpowiada globalnej tendencji przejścia na czystą energię, chociaż pozostawia możliwość dalszego rozwoju bioenergii oraz małych elektrowni wodnych.

Do tego procesu angażowane są duże firmy energetyczne, małe i średnie przedsiębiorstwa, a także poszczególne gospodarstwa domowe. Na przykład wzrost produkcji energii elektrycznej przez gospodarstwa domowe na podstawie użycia paneli słonecznych w latach 2020 i 2021 wyniósł odpowiednio 40,9% i 54,7%. W tym samym okresie produkcja energii z wykorzystaniem biomasy przez małe gospodarstwa rolne wzrosła o 62,8% i 67,0%.

Łączna liczba domowych systemów fotowoltaicznych (SES) na koniec 2021 roku wynosiła 44 888 jednostek, łączna zainstalowana moc – 1 205 MW, a wartość sprzedanej energii elektrycznej po „zielonej” taryfie wyniosła 1 094 mln kWh (Agencja, 2022). Mimo to potencjał rozwoju odnawialnych źródeł energii na Ukrainie nie jest w pełni wykorzystywany.

Czynniki, które utrudniają lub spowalniają rozwój odnawialnych źródeł energii na Ukrainie, to takie aspekty jak ograniczone zasoby finansowe, niska rentowność inwestycji, zwiększone ryzyko związane z dużą zależnością od warunków pogodowych oraz ograniczone możliwości monetyzacji nadmiaru generowanej energii. Ten kompleks czynników przedstawiony jest na Rysunku 2.3.



Źr.: opr. wł.

Rysunek 2.3. Czynniki, które łącznie lub osobno zmniejszają efektywność rozwoju odnawialnych źródeł energii i stwarzają dodatkowe wyzwania dla zrównoważonego rozwoju tej branży na Ukrainie.

Można wskazać następujące bariery rozwoju energetyki przetwarzanej przedstawione na Rysunku 2.3:

- Niedobór środków publicznych i prywatnych na inwestycje w odnawialne źródła energii w znacznym stopniu spowalnia realizację nowych projektów, szczególnie małych i średnich obiektów OZE. Wiele ukraińskich firm działających w sektorze energetycznym nie dysponuje wystarczającymi środkami obrotowymi ani dostępem do długoterminowego kredytowania na korzystnych warunkach, a środki publiczne są głównie kierowane na pilne potrzeby obrony i odbudowy;
- Inwestycje w odnawialne źródła energii często wymagają znacznych nakładów początkowych, podczas gdy ich opłacalność jest niższa w porównaniu z tradycyjnymi źródłami energii. Z powodu niepewności dotyczącej „zielonych” taryf i potencjalnych czynników ryzyka, inwestorzy zwykle oceniają takie projekty jako mniej atrakcyjne, co negatywnie wpływa na poziom pozyskiwanego kapitału;
- Odnawialne źródła energii, w tym fotowoltaika i elektrownie wiatrowe, w dużej mierze zależą od warunków naturalnych, które mogą być nieprzewidywalne. Zmiany klimatyczne i ekstremalne zjawiska pogodowe, które w ostatnich latach stają się coraz częstsze, mogą wpływać na stabilność produkcji energii, prowadząc do nieprzewidywalnych spadków w produkcji energii. Zmusza to operatorów systemów energetycznych do szukania sposobów bilansowania sieci, co wiąże się z dodatkowymi inwestycjami w systemy magazynowania energii lub integrację z innymi źródłami;
- Nadmiarowa produkcja energii z OZE (kiedy wyprodukowana energia przewyższa bieżące zapotrzebowanie) pozostaje niewykorzystaną sferą do monetyzacji. Na Ukrainie brakuje nowoczesnych technologii do magazynowania energii na dużą skalę, takich jak systemy baterii czy instalacje wodorowe, które mogłyby magazynować nadmiarową energię. Ponadto, ograniczona integracja ukraińskiego systemu energetycznego z europejskim ENTSO-E nie pozwala w pełni wykorzystać możliwości eksportu nadmiaru energii, zwłaszcza w okresach szczytowej produkcji.

Warto zauważyć, że ryzyko inwestycyjne zostało tylko wzmocnione w wyniku agresji wojskowej Rosji. Innym skutkiem jest pojawienie się problemów z realizacją źródeł pokrycia „zielonych” taryf.

Aby pokonać te przeszkody i zapewnić stabilny rozwój odnawialnych źródeł energii, dużą rolę w finansowaniu „zielonych” projektów odgrywają oprócz zagranicznych inwestycji również granty i kredyty oraz wsparcie międzynarodowych organizacji finansowych, takich

jak UE, Bank Światowy, Europejski Bank Odbudowy i Rozwoju (EBOR). Procesy inwestycyjne w systemy magazynowania energii oraz tworzenie warunków do integracji krajowego systemu energetycznego z europejskim ENTSO-E znacznie zwiększają niezawodność i stabilność odnawialnych źródeł energii. Warto również podkreślić znaczenie procesów decentralizacji w kontekście zapewnienia rozproszonej generacji, które wspierają społeczności, zmniejszając zależność od scentralizowanych sieci i zwiększając odporność na kryzysowe sytuacje. Ukraina osiągnęła znaczny postęp w rozwoju odnawialnych źródeł energii, zwłaszcza w sektorach energii słonecznej i wiatrowej. Jednak, aby w pełni uwolnić ten potencjał, konieczne jest rozwiązanie problemów związanych z ograniczeniami finansowymi, zwiększenie rentowności inwestycji i zmniejszenie ryzyka związanego z dużą zależnością od warunków pogodowych. Problemy te pogłębiają się w wyniku wzrostu ryzyka inwestycyjnego i zakłóceń spowodowanych agresją wojskową Rosji, co utrudnia finansowanie „zielonych taryf”. Kontynuacja wsparcia oraz działań strategicznych są niezbędne do zapewnienia i rozszerzenia mocy odnawialnych źródeł energii na Ukrainie.

Aby przezwyciężyć wyzwania związane z rozwojem odnawialnych źródeł energii na Ukrainie, perspektywnym rozwiązaniem jest stworzenie małych sieci generacji energii elektrycznej lub mikrosieci, które zapewniają zdecentralizowaną i stabilną produkcję oraz dystrybucję energii na poziomie lokalnym. W następnym rozdziale omówione zostaną sposoby przezwyciężania ograniczeń w odnawialnej energetyce poprzez tworzenie i rozwijanie praktyk cyfrowych platform dla mikrosieci jako strategicznego podejścia do przezwyciężania tych wyzwań i zwiększenia niezależności energetycznej.

3 Platformy cyfrowe i mikrosieci OZE

W tym rozdziale omówiono istotę oraz społeczno-ekonomiczne cechy wpływu cyfrowych platform i mikrosieci odnawialnych źródeł energii (OZE) na transformacyjne zmiany w lokalnych i globalnych sieciach energetycznych, przechodzących od dominacji systemów scentralizowanych do zdecentralizowanych. Przedstawiono teoretyczny model transformacji energetycznej z wykorzystaniem technologii cyfrowych, który ukazuje wpływ cyfrowych technologii na sektor energetyczny, nawiązując do podobnych zmian, jak przejście od oświetlenia gazowego do elektrycznego w latach 80-tych XX wieku.

W podrozdziale 3.1 omówiono koncepcję „Przemysł 5.0” jako zaawansowanego etapu rozwoju mikrosieci odnawialnych źródeł energii (OZE). Zaprezentowano wpływ cyfrowych platform na wdrażanie procesów produkcji, magazynowania i dystrybucji energii w zdecentralizowanych systemach energetycznych. Omówiono technologiczną integrację takich narzędzi, jak Internet rzeczy (IoT), blockchain oraz sztuczna inteligencja, w celu budowy inteligentnych wirtualnych elektrowni i hybrydowych systemów energetycznych. Analiza skupia się na korzyściach płynących z automatyzacji procesów energetycznych oraz na wyzwaniach związanych z transformacją sektora energetycznego. W szczególności wskazano na znaczenie modułowości wirtualnych elektrowni, które pozwalają na elastyczne zarządzanie rozproszonymi zasobami energetycznymi. Podrozdział kończy się omówieniem społeczno-ekonomicznych aspektów wdrażania „Przemysłu 5.0” w mikrosieciach OZE, w tym wzmacnianiem lokalnej niezależności energetycznej, demokratyzacją dostępu do energii oraz redukcją emisji gazów cieplarnianych.

W podrozdziale 3.2 przedstawiono analizę danych statystycznych dotyczących rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) na poziomie globalnym i lokalnym. Zaprezentowano dynamikę wzrostu mocy wytwórczych OZE, ze szczególnym uwzględnieniem trendów w integracji mikrosieci w systemach energetycznych. Analiza danych potwierdza, że kraje rozwijające się, w tym Ukraina, aktywnie rozwijają technologie OZE w celu zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego oraz ograniczenia emisji CO₂. Podrozdział zawiera porównanie kluczowych wskaźników, takich jak liczba instalacji mikro- i makroenergetycznych oraz poziom udziału energii odnawialnej w krajowych systemach energetycznych. Zidentyfikowano również wyzwania, takie jak brak stabilnych źródeł finansowania i rosnące ryzyko geopolityczne, które wpływają na tempo transformacji energetycznej w niektórych regionach.

W podrozdziale 3.3 omówiono procesy integracji mikrosieci OZE w globalnych i krajowych systemach energetycznych. Przedstawiono funkcjonalność cyfrowych platform wspierających zarządzanie mikrosieciami oraz ich rolę w poprawie stabilności i efektywności dostaw energii. Analiza koncentruje się na procesie przejścia od scentralizowanych do zdecentralizowanych systemów energetycznych, co jest kluczowe dla realizacji globalnych celów zrównoważonego rozwoju. Zaprezentowano także wpływ integracji mikrosieci na rozwój lokalnych społeczności, w tym wzmocnienie niezależności energetycznej, tworzenie nowych modeli biznesowych oraz wspieranie innowacyjnych technologii w sektorze energetycznym. Na zakończenie omówiono wyzwania regulacyjne oraz techniczne związane z szerokim wdrażaniem mikrosieci OZE w kontekście zmienności rynków energetycznych i wzrostu liczby prosumentów.

3.1 Mikrosieci OZE

Technologiczną podstawą oraz organizacyjnym centrum formowania ekosystemu mikrosieci OZE na poziomie lokalnym są cyfrowe platformy, które pełnią ważną rolę w zapewnieniu efektywności łańcucha tworzenia wartości między producentem a konsumentem. Specyfika funkcjonowania mikrosieci OZE polega na tym, że producent i konsument, w zależności od sytuacji, mogą zmieniać role, pełniąc funkcje zarówno producenta, jak i konsumenta, co czyni ich prosumentami, zgodnie z definicją Šajin (2016).

Mikrosieci OZE, działające na platformach cyfrowych, stają się elementami systemu energetycznego zarówno lokalnych społeczności, jak i krajowego systemu energetycznego, łącząc modele scentralizowane i zdecentralizowane. Funkcjonalność cyfrowych platform pozwala zwiększyć efektywność wykorzystania instalacji OZE w gospodarstwach domowych lub małych i średnich przedsiębiorstwach (MŚP), skracając okres zwrotu z inwestycji dla prywatnych właścicieli oraz obniżając koszty dla konsumentów, a także minimalizując ryzyko związane z ciągłością świadczenia usług, jak zauważył Lypov (2023).

Współczesne cyfrowe platformy stały się narzędziem do zbierania danych, analizy, koordynacji i rozdziału przepływów energetycznych, umożliwiając interakcję sieciową między producentem a konsumentem dzięki stałemu monitorowaniu danych o funkcjonowaniu mikrosieci, jak wskazali Lypov i Uszenko (2023).

Cyfrowa transformacja jest głównym źródłem zmian w przebudowie funkcjonowania lokalnych i scentralizowanych systemów energetycznych, a cyfrowe platformy pełnią funkcję modernizacji i tworzenia kombinowanych systemów energetycznych. Koncepcja „platformizacji” w sektorze energetycznym koncentruje się na procesach produkcyjnych

opartych na danych, współpracy sieciowej między niezależnymi producentami energii i przejściu do poziomej interakcji między nimi. Warto zauważyć, że rozpowszechnianie cyfrowych platform wiąże się z nowymi wyzwaniami w sektorze, w tym reindustrializacją, interakcją P2P, zmianami w relacjach własnościowych oraz w polityce konkurencji, a także rozszerzeniem możliwości zapewnienia bezpieczeństwa narodowego i stabilności gospodarczej.

Kolejnym krokiem będzie określenie wpływu upowszechnienia platform zarówno na dużych producentów energii, jak i MŚP oraz ustalenie podstaw koncepcyjnych dla zrozumienia przejścia do zdecentralizowanych i kombinowanych sieci energetycznych. Kierunki zmian w energetyce są wyznaczone przez kluczowe trendy rozwoju i wdrażania nowych technologii, rosnącą dynamikę rynków energetycznych oraz wzmocnienie roli regulacji państwowych w kontekście zwiększonej zmienności i niepewności w środowisku biznesowym.

Departament Energetyki Stanów Zjednoczonych, w kontekście uznania krajowego znaczenia tego procesu, promuje integrację odnawialnych źródeł energii poprzez systemowe projektowanie, planowanie i eksploatację sieci elektrycznych, por. U.S. Department of Energy (DOE) (2020). Wśród priorytetowych działań wymienia się:

- zmniejszenie emisji dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń powietrza poprzez zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii oraz innych form czystej rozproszonej generacji;
- zwiększenie wykorzystania aktywów poprzez integrację rozproszonych systemów i obciążeń klientów w celu zmniejszenia szczytowego zapotrzebowania i obniżenia kosztów energii;
- wspieranie realizacji standardów portfela odnawialnych źródeł energii oraz efektywności energetycznej;
- poprawa niezawodności, bezpieczeństwa i odporności aplikacji mikrosieci w ochronie krytycznej infrastruktury oraz obszarów sieci elektroenergetycznych o wysokim stopniu ograniczenia;
- zmniejszenie zużycia paliw poprzez zapewnienie pracy pojazdów elektrycznych.

Podsumowując, obecna cyfrowa transformacja w energetyce będzie procesem stopniowym, ale ostatecznie zmieni strukturę branży, przechodząc od systemów scentralizowanych do zdecentralizowanych i kombinowanych. Integracja mikrosieci OZE koncentruje się na włączeniu odnawialnej, rozproszonej produkcji energii, magazynowania energii i reagowania na popyt w systemie dystrybucji i przesyłania energii elektrycznej.

3.2 „Przemysł 5.0” - model rozwoju mikrosieci OZE

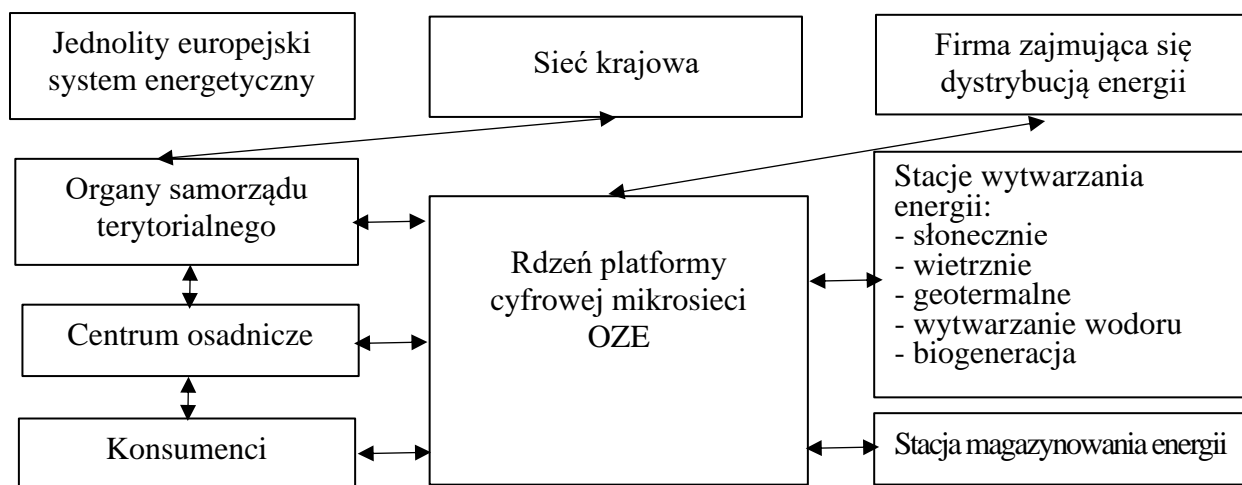
Obecnie zostaną przedstawiono analiza przestrzennych mechanizmów zmian w sektorze energetycznym, z uwzględnieniem specyfiki wpływu cyfrowych platform i mikrosieci OZE na strukturalne transformacje, efektywność operacyjną oraz rolę regulacji państwowych w kontekście integracji nowych technologii z istniejącymi strukturami. Rendy *i in.* (2021), zauważa, że wprowadzenie cyfrowych platform w ramach małej produkcji energii pozwala sektorowi energetycznemu wdrożyć model "Przemysł 5.0" integrujący procesy produkcji, magazynowania i dystrybucji energii jako składniki jednego systemu odpowiedzialnej społecznie interakcji.

W ramach projektów takich jak Siemens IREN2 i mikrosieci Brooklyn, ta cyfrowa transformacja wykorzystuje technologie, takie jak Internet rzeczy, algorytmy typu blockchain oraz sztuczną inteligencję, aby tworzyć "inteligentne wirtualne elektrownie" — samoregulujące się systemy hybrydowe (cyber-fizyczne), wspierające zdecentralizowane, odporne i efektywne sieci energetyczne zarówno na poziomie lokalnym, jak i globalnym.

Zastosowanie cyfrowych platform w sieci mikrosieci ukazuje innowacyjny potencjał rozwoju globalnego rynku energetycznego w kontekście realizacji "Przemysłu 5.0". Obejmuje to pełny cykl procesów produkcyjnych i zarządzających – generację, magazynowanie, wsparcie, dystrybucję i konsumpcję energii w jednym systemie oraz demokratyzację angażowania mieszkańców lokalnych społeczności w rozwiązywanie problemów związanych z wzmocnieniem stabilności energetycznej i poprawą jakości życia w społecznościach.

Charakterystyczną cechą budowy cyfrowych platform w obszarze produkcji energii na bazie "Przemysłu 5.0" jest pełna automatyzacja interakcji między wszystkimi uczestnikami procesu produkcji i konsumpcji energii. Cyfrowe platformy umożliwiają szybkie reagowanie na zmiany zachodzące w wewnętrznej strukturze systemu pod wpływem środowiska zewnętrznego. Rdzeń platformy jako technologiczny element modelu "Przemysł 5.0" w energetyce zapewnia koordynację działań wszystkich składników. Cyfrowy bliźniak mikrosieci OZE umożliwia śledzenie procesów zachodzących w ekosystemie cyfrowej platformy przez obiekty fizyczne. Internet rzeczy, cyfrowe ekosystemy, duże zbiory danych, systemy zarządzania algorytmicznego i sztuczna inteligencja stanowią elementy technologicznego wsparcia działania mikrosieci OZE. Na rysunku 4.1 przedstawiono strukturę cyfrowej platformy w systemie globalnej produkcji energii.

Struktura cyfrowej platformy mikrosieci OZE w systemie globalnej produkcji energii.



Źr.: opr. wł.

Rysunek 3.1. *Struktura platformy cyfrowej mikrosieci OZE w światowym systemie wytwarzania energii integruje różnych producentów energii, w tym słonecznej, wiatrowej, wodnej, geotermalnej, bioenergii, skojarzonych źródeł energii i stacji magazynowania - „prosumentów” tworząc rdzeń platformy mikrosieci OZE. Platforma ta staje się przyczółkiem systemu energetycznego współdziałającego z krajową siecią energetyczną. Ten ostatni z kolei jest podłączony do Jednolitego Europejskiego Systemu Energetycznego.*

Na Rysunku 3.1 przedstawiono strukturalne elementy cyfrowej platformy mikrosieci OZE. Model zastosowania zasad „Przemysłu 5.0” w energetyce zakłada integrację właścicieli indywidualnych systemów dachowych fotowoltaicznych, turbin wiatrowych, instalacji biogazowych i hydroenergetycznych, a także stacji magazynowania energii w jednolitą lokalną ekosystemu cyfrowej platformy. Dzięki temu zapewnia się motywację właścicieli do monetyzacji nadwyżek energii wytwarzanej, umożliwiając im dołączenie do rynku detalicznego energii elektrycznej. Przy tym niskie koszty transakcyjne wymiany przepływów energetycznych pozostają minimalne.

Rdzeń cyfrowej platformy stanowi główny technologiczny element modelu „Przemysł 5.0” w mikrosieci OZE, który zapewnia koordynację działań wszystkich składników. Ich zastosowanie pozwala na połączenie w jednym procesie produkcyjnym maksymalnej liczby uczestników lub komponentów technologicznych, niezależnie od ich rozmieszczenia przestrzennego (lokalne/globalne) oraz charakteru interakcji (hierarchiczna podległość, interakcja horyzontalna). W tym rozdziale rozważane jest znaczenie integracji mikrosieci OZE w systemie „Przemysł 5.0” w kontekście wzmacniania społecznego wymiaru interakcji społeczności lokalnych w celu zwiększenia odporności energetycznej. Strukturalny element modelu mikrosieci

OZE obejmuje składniki zapewniające generację, magazynowanie, dystrybucję przepływów energetycznych, zbieranie i analizowanie odpowiednich danych, szybkie reagowanie i zarządzanie przepływami energetycznymi w mikrosieci OZE, a także integrację z krajowym systemem energetycznym oraz poprzez niego, z jednolitą europejską siecią energetyczną.

O realizmie modelu „Przemysł 5.0” w perspektywie społeczno-politycznej globalizującego się świata przesądzą następujące dwa aspekty. Po pierwsze, jest to pełne wsparcie realizacji globalnych celów zrównoważonego rozwoju z naciskiem na synergii cyfrowych i zielonych transformacji. Po wtóre, wpływa na to wzmocnienie odporności łańcuchów wartości na zjawiska kryzysowe i procesy (działania wojenne, epidemie itp.). Całościowo przyczynia się to do tendencji systemów społeczno-ekonomicznych, a w szczególności energetycznych, do globalnej integracji na podstawie transformacji warunków i składników systemu zapewnienia życia ludzi.

3.3 Ekosystem mikrosieci a przyspieszenie zrównoważonego rozwoju

Koncepcja Smart Grid (inteligentnych sieci) polega na wdrażaniu innowacyjnych technologii, w tym informacyjnych i telekomunikacyjnych, do systemów elektroenergetycznych w celu zwiększenia ich efektywności, opłacalności i niezawodności. Dzięki temu sieć energetyczna staje się bardziej elastyczna, zautomatyzowana i zdolna do samodzielnego nadzoru. Rozbudowa ekosystemu mikrosieci na drodze przyspieszania zrównoważonego rozwoju sprzyja integracji odnawialnych źródeł energii oraz minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko, zmniejszając zależność od tradycyjnych źródeł energii, a także zapewniając lokalną niezależność energetyczną społeczności, zwiększając odporność na zewnętrzne czynniki kryzysowe. Andriushchenko *i in.* (2019) rozważają wdrożenie technologii Smart Grid jako naturalną ewolucję systemu energetycznego, który poprawia efektywność energetyczną i zapewnia dokładne obliczenia. Mikrosieci OZE łączą na poziomie lokalnym małych producentów energii elektrycznej (gospodarstwa rolne, małe przedsiębiorstwa, gospodarstwa domowe, przedsiębiorstwa komunalne). Kwasinski (2016) określają je jako „...grupę powiązanych obciążeń i rozproszonych zasobów energetycznych w wyraźnie określonych granicach elektrycznych, które działają jako jedność kontrolowana w odniesieniu do sieci....”.

Główne cechy inteligentnych mikrosieci obejmują: automatyzację zarządzania i monitorowanie, dwustronną wymianę informacji i energii, integrację odnawialnych źródeł energii, redukcję strat w sieci i oszczędność zasobów, rozwój systemów zdecentralizowanych.

1. Automatyzacja zarządzania i monitorowanie. Dzięki inteligentnym czujnikom i systemom monitorowania Smart Grid automatycznie śledzi stan sieci i szybko reaguje na zmiany, co pozwala unikać przerw w dostawach energii.
2. Dwustronna wymiana informacji i energii. Technologia Smart Grid pozwala firmom energetycznym i konsumentom wymieniać dane w czasie rzeczywistym, co umożliwia optymalizację zużycia energii, zmniejszając koszty dla użytkowników i pomagając utrzymać stabilność systemu.
3. Integracja odnawialnych źródeł energii (OZE). Smart Grid ułatwia pracę elektrowni słonecznych i wiatrowych, które zazwyczaj charakteryzują się niestabilnością generacji, i pomaga stabilizować ich wpływ na ogólną sieć energetyczną.
4. Redukcja strat w sieci i oszczędność zasobów. Optymalizowane zarządzanie i technologie oszczędzania energii zmniejszają straty energii podczas transportu i dystrybucji, czyniąc system bardziej ekologicznym.
5. Rozwój systemów zdecentralizowanych. Wspieranie mikrosieci i rozproszonej generacji pozwala na tworzenie autonomicznych systemów zasilania na poziomie poszczególnych społeczności lub przedsiębiorstw.

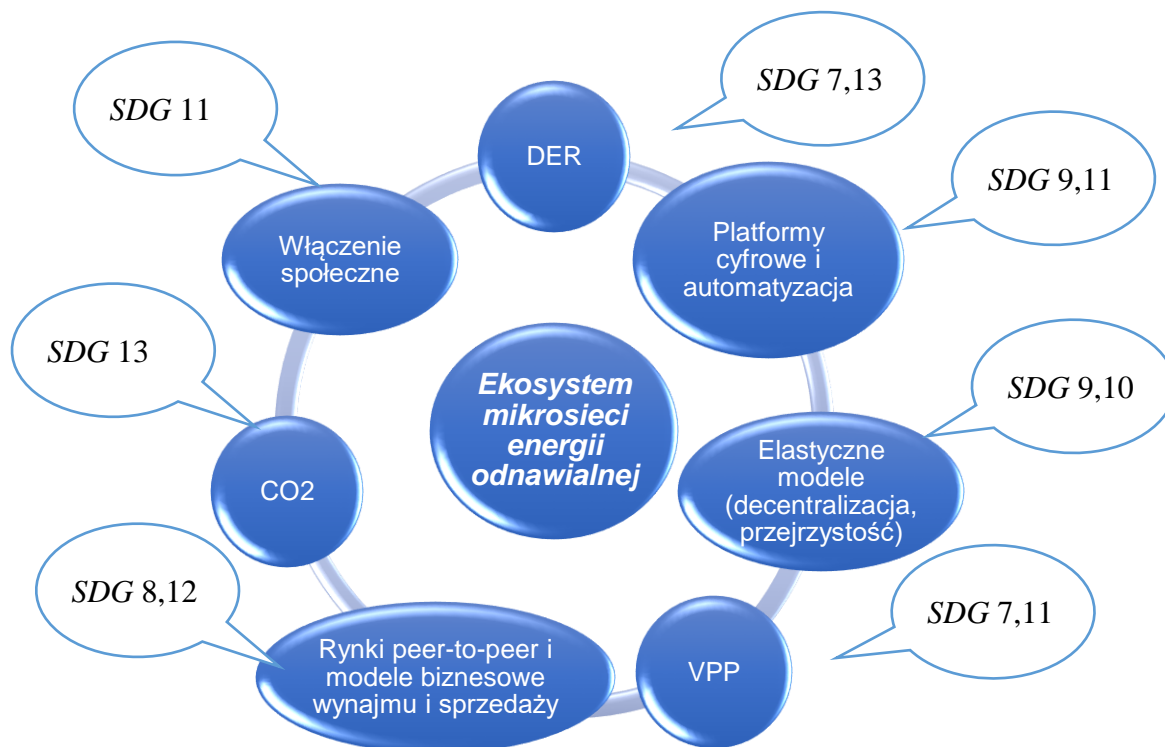
Koncepcja Smart Grid ma na celu stworzenie bardziej stabilnego, niezawodnego i adaptacyjnego systemu elektroenergetycznego, który będzie w stanie odpowiadać na współczesne wyzwania, takie jak wzrastający popyt na energię elektryczną, integrację OZE oraz potrzebę poprawy efektywności energetycznej.

Mikrosieci sprzyjają osiągnięciu zrównoważonego rozwoju energetycznego, ponieważ zapewniają integrację odnawialnych źródeł energii i sprzyjają autonomii energetycznej na poziomie lokalnym. Budowa ekosystemu mikrosieci obejmuje współdziałanie kilku kluczowych komponentów, w tym lokalną generację energii, rozproszone zasoby energetyczne (ang. *Distributed Energy Resources, DER*), platformy cyfrowe do automatyzacji i efektywnego zarządzania przepływami energetycznymi oraz nowoczesne modele biznesowe do wynajmu i sprzedaży nadmiaru energii. Takie systemy nie tylko przyczyniają się do redukcji emisji gazów cieplarnianych, ale również poprawiają bezpieczeństwo energetyczne i elastyczność sieci energetycznych, zmniejszając zależność od centralnego zaopatrzenia w energię.

Biorąc pod uwagę liczne korzyści ekologiczne i społeczno-ekonomiczne, mikrosieci stają się kluczowym elementem w rozwoju zrównoważonej przyszłości energetycznej, przyczyniając się do osiągnięcia globalnych celów zrównoważonego rozwoju. Na rysunku 3.2

przedstawiono elementy strukturalne ekosystemu mikrosieci oraz zaprezentowano system wartości w kontekście osiągnięcia zrównoważonego rozwoju I jego celów *SDG*.

Ekosystem mikrosieci przez pryzmat zrównoważonego rozwoju



Źr.: opr. wł.

Rysunek 3.2. Elementy strukturalne ekosystemu mikrosieci OZE charakteryzują system wartości w kontekście przyspieszenia realizacji globalnych celów zrównoważonego rozwoju. Głównym priorytetem wśród zbioru wartości jest *SDG 11* „Zapewnienie otwartości, bezpieczeństwa, stabilności i zrównoważonego rozwoju miast i osiedli”.

W budowie ekosystemu mikrosieci (mikrosieć) na rysunku 3.2. w celu przyspieszenia zrównoważonego rozwoju warto wyróżnić kluczowe elementy strukturalne:

1. Lokalna produkcja energii i DER.
2. Integracja z platformami cyfrowymi i automatyzacja.
3. Funkcjonowanie modeli wynajmu oraz sprzedaży nadmiaru energii
4. Modułowe i wirtualne elektrownie (VPP).
5. Zdecentralizowana wymiana energii poprzez cyfrowy rynek energetyczny.
6. Korzyści ekologiczne i społeczno-ekonomiczne mikrosieci (mikrosieć).

Lokalna produkcja energii i DER. Lokalne producenci energii - małe przedsiębiorstwa, gospodarstwa rolne, gospodarstwa domowe i przedsiębiorstwa komunalne, które produkują

energię elektryczną z odnawialnych źródeł, takich jak panele słoneczne, małe elektrownie wiatrowe, systemy bioenergetyczne. Rozproszone zasoby energetyczne (DER) to małe autonomiczne zasoby, które mogą zarówno wytwarzać, jak i przechowywać energię. Są to m.in. panele fotowoltaiczne na dachach, domowe akumulatory, małe turbiny wiatrowe, które zapewniają elastyczność w wykorzystywaniu energii na poziomie lokalnym. Lokalne źródła energii odnawialnej, takie jak panele słoneczne, wspierają SDG 7 (Dostępna i czysta energia), ponieważ rozszerzają dostęp do stabilnej i ekologicznej energii, szczególnie w odosobnionych rejonach. Wspierają również SDG 13 (Zwalczanie zmian klimatu) dzięki redukcji emisji gazów cieplarnianych, które powstają podczas tradycyjnej produkcji energii z paliw kopalnych.

Integracja z platformami cyfrowymi i automatyzacja to po pierwsze wykorzystanie platform cyfrowych do automatyzacji procesów wymiany i sprzedaży energii w ramach lokalnych sieci mikrosieci. Platformy te pozwalają zmniejszyć koszty transakcyjne oraz poprawić kontrolę nad dystrybucją zasobów energetycznych. Po drugie, wdrożenie systemów zarządzania DER, które koordynują działanie różnych zasobów energetycznych w ramach mikrosieci, zapewnia stabilność dostaw energii. Automatyzacja zapewnia integrację takich urządzeń jak panele fotowoltaiczne i akumulatory w wirtualne elektrownie i inne większe modułowe sieci.

Rozwój platform cyfrowych dla biznesu i rynków *peer-to-peer* jest ściśle związany z wdrożeniem technologii rozproszonych zasobów energetycznych (DER). Aktywa DER, takie jak panele fotowoltaiczne czy małe akumulatory, umożliwiają zarówno samodzielne zużycie energii, jak i sprzedaż jej w ramach mikrosieci. Tworzy to nowy poziom autonomii energetycznej, umożliwiając łączenie zasobów w wirtualne elektrownie oraz zmniejszanie obciążenia centralnych sieci energetycznych. Zastosowanie platform cyfrowych upraszcza transakcje w środowisku DER, automatyzując wymianę energii i integrację urządzeń, takich jak rozproszone panele fotowoltaiczne. To sprzyja rozwojowi cyfrowych rynków energetycznych, gdzie uczestnicy mogą kupować lub sprzedawać nadmiar energii poprzez platformy informacyjne. W połączeniu z technologiami inteligentnych sieci, cyfrowa automatyzacja pozwala optymalizować produkcję i zużycie energii w zdecentralizowanych systemach, zwiększając odporność i efektywność zużycia energii. Takie zmiany stymulują rozwój rynku zarządzania energią w domu, wspierają wzrost udziału odnawialnych źródeł energii i zachęcają konsumentów do aktywnego zarządzania własną energią.

Wykorzystanie platform cyfrowych do zarządzania DER wspiera SDG 9 (Przemysł, innowacje i infrastruktura) poprzez wdrażanie innowacyjnych rozwiązań w sektorze

energetycznym. Automatyzacja procesów pomaga zapewnić stabilne dostawy energii, wspierając SDG 11 (Zrównoważony rozwój miast i społeczności).

Rynki peer-to-peer i modele biznesowe wynajmu oraz sprzedaży nadmiaru energii, takie jak lokalne rynki, na których właściciele DER dopuszczają sprzedaż nadmiaru wytworzonej energii innym uczestnikom mikrosieci, którzy jej potrzebują. Pozwala to zwiększyć efektywność wykorzystania wygenerowanej energii i zmniejszyć obciążenie sieci głównej. Innowacyjne modele biznesowe dla wynajmu i współdzielenia (np. modele "pay-per-use" lub wynajem urządzeń (paneli słonecznych, akumulatorów) dla gospodarstw domowych, które nie mogą sobie pozwolić na pełną instalację).

Lokalne rynki sprzyjają rozwojowi zrównoważonych modeli konsumpcji i produkcji (SDG 12), ponieważ stymulują bardziej efektywne wykorzystanie zasobów energetycznych i minimalizują nadmierne obciążenie centralnych sieci. Możliwość sprzedaży nadmiaru energii pomaga również osiągnąć SDG 8 (Godna praca i wzrost gospodarczy) poprzez tworzenie nowych modeli biznesowych i rynków.

Złączenie lokalnych DER w modułową strukturę sprzyja funkcjonowaniu w jednej wirtualnej elektrowni. VPP pozwala centralnie kontrolować dużą liczbę rozproszonych zasobów, utrzymywać bilans energetyczny w sieci i zapewniać rezerwowe moce. Ponadto modułowość pozwala na elastyczną integrację, umożliwiając szybką adaptację i integrację nowych zasobów energetycznych, dostosowując się do potrzeb lokalnych konsumentów i reagując na zmiany popytu.

Wirtualne elektrownie wspierają SDG 7, zapewniając stabilne i czyste dostawy energii poprzez koordynację rozproszonych zasobów. Modułowość VPP wspiera elastyczność i szybką adaptację do zmiany popytu, co jest ważne dla zapewnienia niezawodności dostaw energii w miastach i obszarach wiejskich (SDG 11).

Zdecentralizowana wymiana energii poprzez cyfrowy rynek energetyczny i platformę informacyjną zapewnia zwiększoną przejrzystość i sprzyja tworzeniu elastycznych modeli zarządzania energią. Wspiera działanie zdecentralizowanego rynku, umożliwiając uczestnikom mikrosieci wymianę energii w czasie rzeczywistym i interakcję z głównym systemem energetycznym. Zastosowanie technologii cyfrowych pozwala na automatyzację procesów wymiany energii, zmniejszając koszty prowadzenia działalności i zwiększając konkurencyjność lokalnej energetyki. Ten element wspiera SDG 9, stymulując rozwój rozwiązań cyfrowych dla infrastruktury energetycznej i zwiększając konkurencyjność

lokalnych rynków energetycznych. Jednocześnie wspiera SDG 10 (Zmniejszenie nierówności), zapewniając dostęp do taniej i czystej energii dla większej liczby osób.

Korzyści ekologiczne i społeczno-ekonomiczne mikrosieci z wykorzystaniem OZE znacznie zmniejsza zależność od paliw kopalnych, co pomaga zredukować emisję gazów cieplarnianych i przyczynia się do poprawy sytuacji ekologicznej. Ogólnie rzecz biorąc, mikrosieci zapewniają inkluzję na rynku energetycznym, stabilne dostawy energii, zwłaszcza w warunkach kryzysowych lub przerwach w pracy sieci głównej. Wykorzystanie mikrosieci z OZE przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego i zrównoważonego rozwoju lokalnych społeczności, zmniejszając zależność od paliw kopalnych, wspierając SDG 13. Ponadto zapewnienie stabilnych dostaw energii nawet w czasie kryzysu zwiększa bezpieczeństwo energetyczne społeczności, co odpowiada SDG 11.

Strukturalne elementy ekosystemu mikrosieci zwiększają jej efektywność i elastyczność, wspierają wzrost gospodarczy poprzez rozwój nowych relacji rynkowych i modeli biznesowych, a także zapewniają zrównoważony rozwój dzięki integracji odnawialnych źródeł energii i technologii cyfrowych.

Współczesne podejście do decentralizacji i dywersyfikacji dostaw energii, jak również technologii zarządzania nią, wpływa na poprawę wyników ekonomicznych i środowiskowych, umożliwiając bardziej efektywne zarządzanie zasobami oraz wspierając innowacje w sektorze energetycznym.

4 Globalizacyjny kontekst rozwoju mikrosieci OZE

Formowanie mikrosieci OZE jest związane z procesami globalizacji. Warto uwzględnić dwustronny charakter tego procesu, wzajemny wpływ globalizacji oraz rozwoju mikrosieci OZE. Paradoksalnie, nasilenie lokalizacji w energetyce prowadzi do istotnych zmian na poziomie globalnym. Odbywa się gruntowna transformacja sektora wytwarzania energii, globalnych rynków energetycznych oraz systemów powiązań i wzajemnych zależności między krajami i regionami będącymi uczestnikami globalnej interakcji. Zaslugują na uwagę badacze także te aspekty, że rozprzestrzenianie się skutków tej transformacji wykracza daleko poza ekonomiczne relacje. Zapewnia się demokratyzację relacji między producentami a konsumentami energii, likwidację monopolu w systemach scentralizowanej produkcji energii, por. Moret i Pinson (2018). Demokratyzacja interakcji uczestników mikrosieci OZE na poziomie lokalnym, dzięki zmniejszeniu zależności od paliw kopalnych, stanowi impuls do procesu demokratyzacji międzynarodowych relacji w energetyce. Rozwój mikrosieci OZE sprzyja zmniejszeniu zależności importerów paliw kopalnych od krajów - dostawców. Otwiera się możliwość przekształcenia centrów globalnego wpływu, zmiany roli i miejsca poszczególnych krajów, a nawet regionów, demokratyzacji interakcji na poziomie globalnym. Rozwój współpracy właścicieli elektrowni OZE na poziomie lokalnym nabiera szczególnego znaczenia w kontekście działań na rzecz wspierania zrównoważonego rozwoju, por. Bauwens i Eyre (2017). Przyjrzyjmy się niektórym aspektom interakcji rozwoju mikrosieci OZE i globalizacji bardziej szczegółowo.

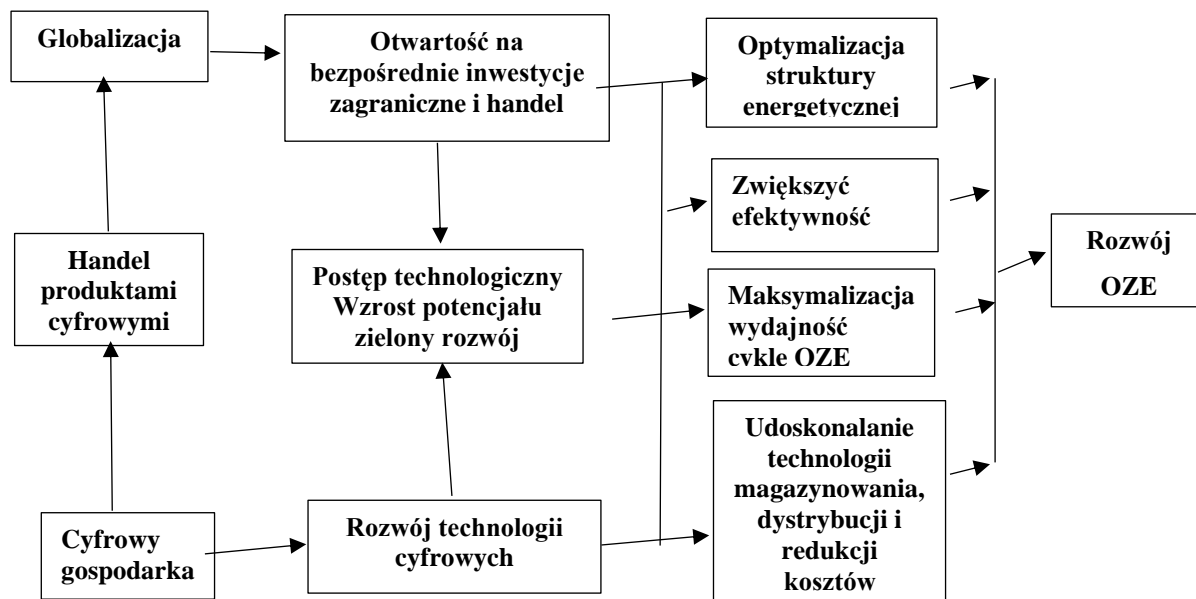
Autorzy badania „Wpływ globalizacji gospodarki na odnawialną energetykę w krajach OECD” proponują traktowanie globalizacji gospodarczej jako mechanizmu wspierającego szerzenie się OZE jako elementu wspierającego zrównoważony rozwój, por. Gozgor i in., (2020). Można wyróżnić kilka składników tego procesu. Jak najbardziej oczekiwane jest, że intensyfikacja międzynarodowej interakcji wspieranej przez globalizację przyczynia się do rozwoju odnawialnej produkcji energii. Im intensywniejsza interakcja kraju z otoczeniem, tym szybciej innowacyjne technologie, do których należą technologie OZE, trafiają na wewnętrzne rynki innych krajów, ułatwiając zapożyczanie odpowiednich wiedzy i umiejętności pracy z nimi, por. Zeren i Akku, (2020). Jednocześnie Doytch i Narayan (2016) zauważają, że ułatwia się międzynarodowy przepływ inwestycji, skierowanych na wsparcie rozwoju OZE w różnych regionach świata. Poziom rozwoju odnawialnej produkcji energii w kraju zależy od takich wskaźników, jak poziom rozwoju sektora finansowego, dostępność bezpośrednich inwestycji zagranicznych, poziom dochodów ludności oraz ceny energii elektrycznej, por. Anton i Afloarei

(2020). Producenci odpowiednich urządzeń, instytucje finansowe krajów, które one reprezentują, są zainteresowani wspieraniem promocji swoich produktów na globalnych rynkach. W końcowym efekcie globalizacja znacznie ułatwia szybkie rozprzestrzenianie się i skalowanie technologii odnawialnej produkcji energii. Z kolei łączenie poszczególnych elektrowni OZE w mikrosieci, dzięki możliwości monetyzacji nadmiarowej produkcji energii, zapewnia zwiększenie efektywności wykorzystania sprzętu oraz przyspieszenie jego zwrotu. Kluczowymi czynnikami wpływającymi na intensyfikację tego procesu i specyficzne jego przejawy w poszczególnych krajach są dochód i poziom emisji dwutlenku węgla na osobę, stopień rozwoju i organizacja systemu scentralizowanej produkcji energii, proporcje i poziom cen paliw kopalnych oraz odnawialnych źródeł energii, a także poziom i charakter wsparcia wdrażania tych ostatnich przez państwo.

W kontekście tematu badania szczególną uwagę zwraca związek między globalizacją, wdrażaniem technologii cyfrowych a rozwojem odnawialnej produkcji energii. Cyfryzacja stosunków gospodarczych otwiera szerokie możliwości handlu produktami cyfrowymi oraz wykorzystania technologii cyfrowych do ułatwienia międzynarodowych operacji handlowych oraz bezpośrednich inwestycji międzynarodowych jako kluczowych składników globalizacji gospodarczej. W połączeniu ze stymulowaniem dalszego rozwoju technologii cyfrowych przyczynia się do przyspieszenia postępu technologicznego oraz wzrostu potencjału zielonego rozwoju. W energetyce procesy te przejawiają się poprzez udoskonalenie technologii przechowywania i dystrybucji energii, redukcję kosztów, ograniczenie związanych z tym wydatków, maksymalizację wydajności oraz zwiększenie efektywności cykli OZE. Wynikiem jest optymalizacja struktury energetycznej (por rys. 4.1), por. Zhang i in. (2022).

Jednocześnie warto zauważyć, że rozwój mikrosieci OZE wywiera odwrotny wpływ na procesy globalizacji. Tworzenie mikrosieci OZE przyczynia się do zwiększenia efektywności wykorzystania potencjału odnawialnych źródeł energii, co prowadzi do obniżenia kosztów energii. Już teraz powstaje sytuacja, w której tradycyjny, scentralizowany system zaopatrzenia w energię staje się niekonkurencyjny w porównaniu z rozproszonymi systemami wytwarzania energii. Rosnący udział OZE w strukturze konsumpcji energii prowadzi do znacznych zmian na globalnych rynkach energetycznych. Eksperci z McKinsey przewidują, że do 2050 roku udział odnawialnych źródeł w globalnej konsumpcji energii osiągnie od 65% do 80%⁶, por. McKinsey&Company (2024).

Mechanizm wpływu globalizacji i cyfryzacji gospodarki na rozwój odnawialnej produkcji energii



Źr.: opr. wł.

Rysunek 4.1. Elementy strukturalne mechanizmu wpływu globalizacji i cyfryzacji gospodarki na rozwój OZE charakteryzują procesy optymalizacji struktury energetycznej, co dodatkowo wpływa na rozwój energetyki odnawialnej.

Na rysunku 4.1. przedstawiono strukturalny model mechanizmu wpływu globalizacji i cyfryzacji gospodarki na rozwój OZE. Model ukazuje, jak otwartość na bezpośrednie inwestycje zagraniczne, handel oraz rozwój technologii cyfrowych przyczyniają się do optymalizacji struktury energetycznej, zwiększenia efektywności i maksymalizacji wydajności OZE. Dodatkowo podkreślono znaczenie udoskonalania technologii magazynowania i dystrybucji energii w celu redukcji kosztów. Taka systematyzacja danych pozwala zidentyfikować kluczowe procesy wpływające na transformację energetyczną, wspiera planowanie strategii rozwoju OZE oraz wskazuje na powiązania między globalizacją, cyfryzacją i zrównoważonym rozwojem sektora energetycznego.

Wzrost znaczenia systemów rozproszonej produkcji energii stwarza możliwość demonopolizacji rynków energetycznych. Przede wszystkim kraje rozwinięte, znajdujące się w strefach klimatycznych sprzyjających generacji energii słonecznej, aktywnie dążą do rozwoju systemów rozproszonej generacji. Systemy scentralizowane tracą przewagę konkurencyjną. Już dziś niektóre miasta w USA zaspokajają swoje potrzeby energetyczne w 80% dzięki OZE. Mikrosieci zdobywają szeroką popularność jako kluczowy element systemu

zaopatrzenia w energię. Połączenie rozwoju technologii OZE i technologii zwiększających efektywność wykorzystania zasobów energetycznych, oparte na cyfryzacji, stwarza możliwości znacznego ograniczenia zużycia paliw kopalnych. Kraje eksportujące ropę i gaz napotykać zagrożenie szybkiej utraty źródeł finansowania rozwoju własnej gospodarki, a także tracą narzędzia wpływu w zglobalizowanym świecie. Otwiera się perspektywa kolejnej redystrybucji roli i miejsca w globalnej gospodarce, nie tylko dla poszczególnych państw, ale także dla ich grup oraz regionów świata.

Rozwój mikrosieci OZE jest jednocześnie produktem globalizacji oraz narzędziem jej dalszego rozwoju, nawet w czasach, gdy ogólny trend intensywnego rozwoju globalizacji zmienia się w przeciwnym kierunku. Paradoks tego procesu podkreśla fakt, że u podstaw idei tworzenia mikrosieci OZE leży dążenie do rozwiązywania lokalnych problemów danej społeczności bez polegania na zewnętrznych źródłach energii. Jednak nawet w tym przypadku uzyskany rezultat ma wpływ wykraczający daleko poza tę społeczność.

5 Uwagi końcowe

Aktualny krajobraz geopolityczny, charakteryzujący się nasilonymi działaniami krajów agresywnych w celu zagrożenia bezpieczeństwu energetycznemu Ukrainy, podkreśla pilną potrzebę nowatorskich rozwiązań mających na celu utrzymanie stabilności systemu energetycznego kraju. W tym kontekście rozwój odnawialnych źródeł energii o małej skali jest szczególnie obiecujący. Ukraina osiągnęła znaczące sukcesy w zwiększaniu mocy w zakresie energii słonecznej i biomasy, zwłaszcza w małych gospodarstwach rolnych. Mimo tych osiągnięć pełny potencjał wytwarzania energii odnawialnej pozostaje w dużej mierze niewykorzystany. Do czynników wpływających na to należą ograniczone zasoby finansowe dostępne dla firm i gospodarstw domowych, niewystarczające wsparcie ze strony państwa oraz zwiększone ryzyko inwestycyjne związane z trwającym konfliktem zbrojnym, który pogłębia niepewność co do opłacalności zobowiązań w zakresie „zielonych” taryf.

Realną strategią na pokonanie tych wyzwań jest integracja małych producentów energii – tych, którzy wykorzystują odnawialne źródła, takie jak energia słoneczna, wiatrowa, hydroenergia i biomasa, w lokalnych mikrosieciach. Tworzenie tych mikrosieci ułatwia rozwój platform cyfrowych, które zapewniają interakcję typu „peer-to-peer” na rynkach energetycznych oraz wymianę nadwyżek produkcji energii. Platformy te umożliwiają wymianę energii elektrycznej między uczestnikami, zwiększając ogólną efektywność systemów energetycznych i skracając okresy zwrotu inwestycji w sprzęt do generowania i magazynowania energii dzięki zoptymalizowanemu wykorzystaniu. Ten zintegrowany model nie tylko wspiera efektywne wykorzystanie sprzętu, ale także zwiększa niezawodność lokalnych dostaw energii, co z kolei obniża koszty energii elektrycznej i pozwala na sprzedaż nadwyżek, które w przeciwnym razie mogłyby zostać niewykorzystane.

Ukraina kontynuuje swoją drogę integracji z Europą, a jednocześnie istnieje znaczący potencjał do dalszej współpracy na poziomie transgranicznym, w szczególności poprzez inicjatywy takie jak projekty Euroregionu. Jednakże przejście na cyfrową oraz platformową produkcję i dystrybucję energii wiąże się z własnymi wyzwaniami. Należy do nich konieczność dokładnego gromadzenia danych od uczestników platformy, rosnące znaczenie komponentów wirtualnych w produkcji energii oraz tworzenie struktur sieciowych, które działają jako łańcuchy wartości dodanej w sektorze. Ten proces integracji sprzyja połączeniu licznych małych producentów energii w jedną wirtualną sieć produkcyjną, co zasadniczo zmienia relacje własnościowe w branży.

Rozwój mikrosieci OZE na poziomie lokalnym jest zarówno wynikiem globalnych trendów, jak i czynnikiem globalnych zmian. Powstanie i szybkie rozprzestrzenianie się mikrosieci w wielu krajach na wszystkich kontynentach jest wynikiem wzrastającej otwartości gospodarek narodowych na przełomie tysiącleci, ułatwienia wymiany materialnych, finansowych i intelektualnych aktywów między krajami oraz zwiększonej uwagi na problemy związane z zapewnieniem zrównoważonego rozwoju. Z drugiej strony, sukces rozwoju odnawialnych źródeł energii, w dużej mierze wspierany przez mikrosieci OZE, prowadzi do istotnych globalnych zmian, które wykraczają poza sferę ekonomiczną. Demonopolizacja rynków energetycznych idzie w parze z demokratyzacją relacji między ich uczestnikami. Proces ten przenosi się z poziomu lokalnego na globalny. Rosnący udział energii odnawialnej w globalnym zużyciu energii prowadzi do zmian na rynkach paliw kopalnych, zmieniając rolę i pozycję krajów eksportujących w globalnej gospodarce.

Aby w pełni wykorzystać korzyści oferowane przez małe sieci odnawialnych źródeł energii, konieczne jest kompleksowe podejście, obejmujące szeroki zakres polityk państwowych, w tym inwestycje strukturalne, rozwój naukowo-techniczny, inicjatywy regionalne, regulacje cenowe i wspieranie działalności przedsiębiorczej. Konkretnie środki mogą obejmować udzielanie dotacji i preferencyjnych kredytów, ukierunkowane strategie finansowe, ulgi podatkowe i celne, a także tworzenie rozbudowanych systemów szkoleń i doradztwa dla operatorów małych sieci energetycznych. Ponadto stworzenie sprzyjającego środowiska prawnego oraz uproszczenie procesów dokumentacyjnych będzie kluczowe dla promowania inicjatyw mikrosieci.

Pojawienie się małych sieci odnawialnych źródeł energii może znacząco zmienić dynamikę konkurencji na rynkach energetycznych. Rosnąca konkurencja między wieloma małymi producentami jest uzupełniana ich rywalizacją z systemami scentralizowanej produkcji energii, co potencjalnie skłania do poszukiwania możliwości na rynkach międzynarodowych. Ta zmiana oznacza odejście od klasycznego modelu monopolu naturalnego w kierunku bardziej konkurencyjnej, czteropoziomowej struktury rynkowej, otwartej na globalną konkurencję.

W obliczu trwających zagrożeń dla systemu energetycznego Ukrainy efektywna koordynacja i adaptacja wszystkich komponentów systemu są niezwykle ważne. Konieczne jest maksymalne wykorzystanie potencjału w zakresie generacji, dystrybucji i magazynowania energii, a małoskalowe odnawialne źródła energii oferują znaczną elastyczność i zdolność adaptacji do zmieniających się warunków. Tworzenie mikrosieci

przynosi oczekiwane korzyści synergiczne, które zwiększają efektywność wykorzystania stacji produkcji energii, wspierają stabilność rynku energii i w konsekwencji wzmacniają krajowe bezpieczeństwo energetyczne. Niniejsze badanie analizuje perspektywy i wyzwania związane z rozwojem sieci odnawialnych źródeł energii na Ukrainie o małej skali, koncentrując się na roli platform cyfrowych i mikrosieci w zwiększaniu efektywności energetycznej, stabilności i bezpieczeństwa. Integrując dane z istniejącej literatury, analiza harmonizuje globalne trendy z obecnym krajobrazem energetycznym Ukrainy, podkreślając pilną potrzebę strategicznych inwestycji w małe odnawialne źródła energii. Takie podejście jest istotne dla zapewnienia przyszłości energetycznej Ukrainy w obliczu trwających napięć geopolitycznych, co wzmacnia odporność kraju na zagrożenia zewnętrzne.

6 Bibliografia

'A unique object. How the completion of the Dniester hydro-accumulating power plant will affect the reduction of the deficit of maneuvering capacities'. (2021) [online] https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/unikalniy-obekt-yak-dobudova-dnistrovskoi-gaes-poznachitsya-na-skorochenni. (In Ukrainian).

'The Role of Science, Technology, and Innovation in Promoting Renewable Energy by 2030'. (2019) Geneva, UNCTAD, 51 p.

'Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development'. Resolution of the UN General Assembly dated September 25, 2015 (2015) [online] <https://sdgs.un.org/2030agenda> (accessed 03 January 2023).

Abdmouleh, Z., Alammari, R. and Gastli, A. (2015) 'Review of Policies Encouraging Renewable Energy Integration & Best Practices'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 249–262.

Andriushchenko K., Tepliuk M., Boniar S., Ushenko N. and Liezina A. (2019) 'Influence of cost drivers on value-oriented management of investment activity of companies', *Investment Management and Financial Innovations*, 16(3), pp. 353-364.

Anton, S.G.; Afloarei Nucu, A.E. (2020). The effect of financial development on renewable energy consumption. A panel data approach. *Renew. Energy*. 2020, Vol. 147, P. 330–338. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.005

Bauwens, T., Eyre, N. (2017). Exploring the links between community-based governance and sustainable energy use: Quantitative evidence from Flanders. *Ecological Economics*, No 137, P. 163-172. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.03.006

Bilianskyi, O. and Lypov, V. (2022) 'Regulation of Competition in the Economy of Platforms: Problems and Tools', *Ekonomika Ukraine*, Vol. 2 (723), pp. 3 – 19. (In Ukrainian).

Borenstein, S. (2017) 'Private Net Benefits of Residential Solar PV: the Role of Electricity Tariffs, Tax Incentives, and Rebates'. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, Vol. 4(S1), pp. 85 – 122.

Breuer, H. (2017) 'A Microgrid Grows in Brooklyn'. [online] <https://www.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/energytransition/a-microgrid-grows-in-brooklyn.html>

Camilo, F., Castro, R., Almeida, M. and Pires, V. (2017) 'Economic Assessment of Residential PV Systems with Self-Consumption and Storage in Portugal'. *Solar Energy*, Vol. 150(Jul), pp. 353–362.

Comello, S. and Reichelstein, S. (2017) 'Cost Competitiveness of Residential Solar PV: The Impact of Net Metering Restrictions'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75(Aug), pp. 46–57.

Denysiuk, S., Bielokha, H., Cherneshchuk, I., Lysyi, V. (2023). Global trends in implementation of renewable energy sources and features of their implementation during the recovery of Ukraine's economy. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2022.No 4 p. 7-23

Doytch, N., Narayan, S. (2016). Does FDI influence renewable energy consumption? An analysis of sectoral FDI impact on renewable and non-renewable industrial energy consumption. *Energy Econ*. Vol. 54, 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.12.010>

Eid, C., Reneses G., Javier, F., Mar'in, P. and Hakvoort, R. (2014). 'The Economic Effect of Electricity Net-Metering with Solar PV: Consequences for Network Cost Recovery, Cross Subsidies and Policy Objectives'. *Energy Policy*, Vol. 75(Dec), pp. 244–254.

Elblox Platform. The Regional P2P Energy Market. (2021) [online] <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/alkuperatakuunsertifikaatti/tapahtumamatskut/case-elblox.pdf>

Energy efficiency. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. [online] <https://sae.gov.ua/uk/content/energy-efficiency> (accessed 26 November 2022)

European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Renda, A., Schwaag Serger, S., Tataj, D., Morlet, A., Isaksson, D., Martins, F., Mir Roca, M., Hidalgo, C., Huang, A., Dixon-Declève, S., Bolland, P., Bria, F., Charveriat, C., Dunlop, K., & Giovannini, E. (2021). *Industry 5.0, a transformative vision for Europe : governing systemic transformations towards a sustainable industry*, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/17322>

Fehrenbacher, K. (2017). 'Five Trends for the Smart Energy Home of the Future'. *Greentech Media*, Jan; EIA. 2017 (June). [online] <https://www.greentechmedia.com/articles/read/5-trends-for-the-smart-energy-home-of-the-future> (accessed 2 November 2024).

Fu, R., Feldman, D., Margolis, R., Woodhouse, M. and Ardani, K. (2017) 'US Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017'. Tech. rept. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). [online] <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68580.pdf>

Global Energy Perspective 2024. <https://www.mckinsey.com/industries/energy-and-materials/our-insights/global-energy-perspective>

Hagerman, S., Jaramillo, P. and Morgan, M. (2016). 'Is Rooftop Solar PV at Socket Parity Without Subsidies?' *Energy Policy*, Vol. 89(Feb), pp. 84–94.

Hossain, M. S., Madloul, N. A., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Pandey, A. K., Khan, A. F. (2016) 'Role of smart grid in renewable energy: An overview'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 1168–1184.

- Hrytsenko, A. and Lypov V. (2020) 'Information Platforms as a Network Institutional Transformation', *Journal of Institutional Studies*, Vol. 12(2), pp. 132-148. DOI: 10.17835/2076-6297.2020.12.2.132-148. (In Russian).
- Hurochkina V., Nahaieva O., Rymar O., Chorny O., Makhanets L., and Shyshpanova N. (2021). 'Foreign state economic policy in the context of economic security'. *Journal of Management Information and Decision Sciences*, 24(3), 1-14. <https://www.abacademies.org/journals/month-march-year-2021-vol-24-issue-3-journal-jmids-past-issue.html>
- Hurochkina, V., Kohut, S. (2024). Formation of the energy balance of Ukraine using renewable energy sources. "Economy. Finances. Management: Topical issues of science and practical activity". 4 (66). 109-133. DOI: 10.37128/2411-4413-2023-4-8
- Jenkins, N., Long, C., Wu, J. (2015)'An Overview of the Smart Grid in Great Britain'. *Engineering*, Vol.1 (4), pp. 413–421.
- Karabegović, I. (2021). Tendency of global capacity development of renewable energy sources in the world in the last ten years. *Contemporary Materials*. XII–2(2021) P. 166 – 183. DOI: <https://doi.org/10.7251/COMEN2102166K>
- Karabegović, I., Dolecek, V. (2015). Development and implementation of renewable energy sources in the world and European Union. *Contemporary Materials*. VI–2 (2015) P. 130 – 148.
- Karbovska, L., Yakushik, I., Feshchenko, E.Y., Kalina, I., Kozlova, A. (2021). Sustainable development of the economy and increasing energy security based on the use of res: problems and prospects. *Financial and credit activity: problems of theory and practice*, 2, 438-446.
- Kharlamova, G., Nate, S., Chernyak, O. (2016). Renewable energy and security for Ukraine: challenge or smart way? *The Journal of international studies*, 9, 88-115.
- Kiesling, L. (2016) 'Implications of Smart Grid Innovation for Organizational Models in Electricity Distribution'. *Smart Grid Handbook*, [online]<https://ssrn.com/abstract=2571251>
- Kirchhoff, H., Kebir, N., Neumann, K., et al. (2016) 'Developing mutual success factors and their application to swarm electrification: microgrids with 100% renewable energies in the Global South and Germany'. *J Clean Prod*, Vol. 128, pp. 190-200.
- Klepacka, A. (2019). Significance of renewable energy sources in sustainable development. *Annals PAAAE*, XXI(1), 55-64. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.0852>.
- Klopov I. World trends in the development of renewable energy sources. Collection of scientific papers of the Cherkasy State University of Technology. Series: Economic sciences. 2015. Issue 40(1). P. 59-64. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpchdtu_2015_40%281%29__11 (In Ukrainian).
- Korohodova, O.O., Chernenko, N.O., Moiseienko, T.Y., Hlushchenko. Y.I. (2022). 'Analysis of the attractiveness of renewable energy in individual countries'. *Journal of economic reforms*. Vol. 3(47). pp. 74–82.

Kuzior, A., Lobanova, A., Kalashnikova, L. Green Energy in Ukraine: State, Public Demands, and Trends. *Energies* 2021, 14, 7745. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/22/7745>

Kwan, C. (2012) 'Influence of local environmental, social, economic and political variables on the spatial distribution of residential solar PV arrays across the United States'. *Energy Policy*, Vol. 47(Aug), pp. 332–344.

Kwasinski, A., Weaver, W. and Balog, R. S., 2016 'Microgrids and other local area power and energy systems'. Cambridge University Press, Cambridge. [online] <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139002998>. (accessed 26 November 2022).

Kwasinski, Alexis 2016. *Quantitative Model and Metrics of Electrical Grids' Resilience Evaluated at a Power Distribution Level*. *Energies*, Vol. 9, Issue. 2, p. 93.

Lang, T., Gloerfeld, E. and Girattemptedmpt B. (2015) 'Don't Just Follow the Sun – A Global Assessment of Economic Performance for Residential Building Photovoltaics'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42 (Feb), pp. 932–951.

Lypov V. V. "Mosquito flotilla" on the energy front: small energy networks based on digital platforms. *Economic Theory*. 2023. No. 2. P. 53–70. DOI: <https://doi.org/10.15407/etet2023.02.053> (In Ukrainian).

Lypov, V., Uushenko, N. (2023). The impact of platformization on the development of the renewable energy market in Ukraine: risks and prospects for development. *Modeling the development of the economic systems*, (4), 244–251. <https://doi.org/10.31891/mdes/2023-10-33> (In Ukrainian).

Matviienko H., Kucherкова S., Yanovska V., Ternovsky V., Hurochkina V., Keşy M. *Governmental Management and Regulatory Measures for Advancing AI in the Ukrainian Energy Sector as a Basis for Rapid and sustainable development of the Ukrainian Economy*. Proceedings of the 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), pp. 303-307, 21-23.09.2023. http://acit.wunu.edu.ua/Download/ACIT'2023_Conference%20Program.pdf McKinsey&Company (2024).

Moret, F., Pinson, P. (2018). Energy Collectives: A Community and Fairness Based Approach to Future Electricity Markets. *IEEE Trans. Power Syst.* No 34, P. 3994–4004. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2808961.

Morstyn, T., Farrell, N., Darby, Sarah J. and McCulloch, M. (2018) 'Using Peer-to-Peer Energy-Trading Platforms to Incentivize Prosumers to Form Federated Power Plants'. *Nature Energy*, Vol. 3(2), pp. 94-101.

Olivella-Rosell, P., Bullich-Massagué, E., Aragüés-Peñalba, M., Sumper, A., Ottesen, S.Ø., Vidal-Clos, J.-A. and Villafáfila-Robles, R., (2018) 'Optimization problem for meeting distribution system operator requests in local flexibility markets with distributed energy resources'. *Applied Energy, Elsevier*, Vol. 210(C), pp. 881-895.

Parag, Y. and Sovacool, B. (2016) 'Electricity market design for the prosumer era'. *Nature Energy*, Vol. 1(4), pp. 16-32.

- Parker, G., Van Alstyne, M. and Choudary, S. (2016) *Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You*. W W Norton & Company. 352 pp.
- Pecheniuk A., Garasymchuk I., Potapskyi P., Vusatyi M., Dubik V., Pukas V. (2022) Renewable Energy of Ukraine in Global Energy Transformations. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 5 (4), 19-33. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.050402>
- Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030. Rezolucja przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne w dniu 25 września 2015 r. https://www.unic.un.org.pl/files/164/Agenda%202030_pl_2016_ostateczna.pdf
- Rochet, J. and Tirole, J. (2003) 'Platform Competition in Two-Sided Markets'. *Journal of the European Economic Association*, Vol. 1(4), pp. 990–1029.
- Šajn, N. (2016) Electricity 'Prosumers'. [online] [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/593518/EPRS_BRI\(2016\)593518_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/593518/EPRS_BRI(2016)593518_EN.pdf) (accessed 26 November 2022).
- Schill, W.-P., Zerrahn, A., Kunz, F. (2017) 'Prosumage of solar electricity: Pros, cons, and the system perspective'. *Economics of Energy & Environmental*, Vol. 6, No. 1, pp. 7-32.
- Sevostyanov, N.A., Shaforost, A.O. (2024). Core Directions of Renewable Energy Sources Development. *2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 1-5.
- Shaulska L., Kovalenko S., Allayarov S., Sydorenko O. and Sukhanova A. (2021) 'Strategic enterprise competitiveness management under global challenges'. *Academy of Strategic Management Journal*, № 20, Vol. 4, pp. 1–7.
- Srnicek N. (2017) *Platform Capitalism*. Cambridge: Polity Press, 92 p.
- Tabors, R., Caramanis, M., Ntakou, E., Parker, G., Van Alstyne, M., Centolella, P. and Hornby, R. (2017) 'Distributed Energy Resources : New Markets and New Products'. In: *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 38 – 45.
- Timilsina, G., Kurdgelashvili, L. and Narbel, P. (2012) 'Solar Energy: Markets, Economics and Policies'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16(1), pp. 449–465.
- Trotsenko, L. DTEK initiates an increase in the capacity of green energy in Ukraine. (24.05.2022) [online] <https://ua.korrespondent.net/business/companies/4480792-dtek-initsiuiie-zbilshennia-potuzhnosti-zelenoi-enerhetyky-v-ukraini>. (In Ukrainian).
- Trunina, I.M., Pryakhina, K.A., Yakymets, S. (2022). Research on the Development of Renewable Energy Sources in the World Due to the War in Ukraine. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, 1-5.
- U.S. Department of Energy (DOE). 2020 Smart Grid System Report. https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-05/2020%20Smart%20Grid%20System%20Report_0.pdf

Voronin, A., Panasiuk, P. (2022). State of renewable energy of Ukraine and prospective directions of development. *Scientific opinion: Economics and Management*. Scientific view: Economics and Management, № 1 (77). P. 70-75.

Yakubiv, V.M., Maksymiv, Y., Hryhoruk, I.I., Popadynets, N.N., Piatnychuk, I. (2019). Development of renewable energy sources in the context of energy management. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*. Vol. 6, No. 3-4 (2019), 77-87.

Zaharii, V.K., Kovalchuk, T. (2021). Renewable energy: world development trends and Ukraine. *Herald UNU. International Economic Relations And World Economy*. p.70-76. <http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/>

Zeren, F., Akku,s, H.T. (2020). The relationship between renewable energy consumption and trade openness: New evidence from emerging economies. *Renew. Energy* 2020, 147, 322–329. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.006

Zhang, Z., Su, L., Jin, W., Yang, Y. (2022). The Impact of Globalization on Renewable Energy Development in the Countries along the Belt and Road Based on the Moderating Effect of the Digital Economy. *Sustainability* 2022, 14(10), 6031; <https://doi.org/10.3390/su14106031>

7 Streszczenia

ABSTRACT

The study presents the results of research aimed at determining the strategic potential of implementing digitalization technologies in renewable energy production through the creation of renewable energy microgrids, as well as the impact of such technologies on the processes of evolutionary globalization. Renewable energy is a key element in ensuring sustainable development. The diversity of alternative energy sources and the large number of producers capable of supplying electricity underscore the need for the creation of small energy microgrids. The business model of smart microgrids considered in the study has the potential to stimulate the restructuring of the production system and electricity distribution markets. The study conducted structural, functional, systemic, and institutional analyses. The characteristics of digital platforms as an organizational form of smart microgrids were discussed. These platforms provide a synergistic effect by integrating small renewable energy producers into microgrids, forming a two-sector model for the energy industry. The study analyzes the mechanism for building energy systems based on the principles of "Industry 5.0," as well as aspects of accelerating global sustainable development goals.

АБСТРАКТ

У опрацюванні представлено результати дослідження, метою якого було визначення стратегічного потенціалу впровадження технологій цифровізації у виробництві відновлюваної енергії через створення мікромереж відновлюваної енергії, а також вплив таких технологій на процеси еволюційної глобалізації. Відновлювана енергія є ключовим елементом забезпечення сталого розвитку. Різноманітність альтернативних джерел енергії та велика кількість виробників, здатних пропонувати електроенергію, підкреслюють необхідність створення малих енергетичних мікромереж. Розглянута у дослідженні бізнес-модель розумних мікромереж здатна стимулювати реструктуризацію системи виробництва та ринків розподілу електроенергії. У дослідженні проведено структурний, функціональний, системний та інституційний аналіз. Обговорено характеристики цифрових платформ як організаційної форми розумних мікромереж. Ці платформи забезпечують синергетичний ефект, об'єднуючи малих виробників відновлюваної енергії у мікромережі, що формують двосекторну модель енергетичної промисловості. Аналізується механізм побудови енергетичних систем, заснованих на принципах "Індустрії 5.0", а також аспекти прискорення глобальних цілей сталого розвитку.