dr inż. Tomasz Grudniewski
Akademia Bialska im. Jana Pawła II
ORCID: 0000-0003-3394-8992
https://doi.org/10.29316/9788368103199_8

ZAAWANSOWANE SYSTEMY FOTOWOLTAICZNE JAKO KLUCZOWY CZYNNIK WZMACNIAJĄCY BEZPIECZEŃSTWO ENERGETYCZNE PAŃSTWA

ADVANCED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AS A KEY FACTOR REINFORCING NATIONAL ENERGY SECURITY

Streszczenie

Rozdział przedstawia analizy i wnioski dotyczące roli zaawansowanych systemów fotowoltaicznych w kształtowaniu bezpieczeństwa energetycznego państwa. Wskazano, że rozwój nowoczesnych technologii PV, obejmujących m.in. wysokosprawne ogniwa, magazynowanie energii i inteligentne systemy sterowania, sprzyja dywersyfikacji źródeł, uniezależnieniu od importu paliw kopalnych oraz zwiększeniu odporności krajowej infrastruktury energetycznej. Rozdział analizuje wpływ zaawansowanych systemów fotowoltaicznych na bezpieczeństwo energetyczne państwa. Cel: Określenie, w jaki sposób nowoczesne technologie PV (m.in. wysokosprawne ogniwa, magazyny energii, inteligentne systemy

Summary

This paper examines the impact of advanced photovoltaic (PV) systems on a nation's energy security. Aim: To determine how modern PV technologies (including high-efficiency solar cells, energy storage, and intelligent control systems) can enhance a country's ability to ensure stable and resilient energy supplies. Research Problem: To what extent can advanced photovoltaics reduce dependence on fossil fuels, improve system resilience to disruptions (e.g., extreme weather events and cyberattacks), and help stabilize energy prices? Methods: The study applies a multi-faceted qualitative analysis based on a review of scientific literature and institutional reports (e.g., IEA,

sterowania) mogą wzmocnić zdolność państwa do zapewnienia stabilnych i odpornych dostaw energii. Problem: Czy i w jakim stopniu zaawansowana fotowoltaika zmniejsza zależność od paliw kopalnych, poprawia odporność systemu na zakłócenia (w tym ekstremalne zjawiska pogodowe i ataki cybernetyczne) oraz sprzyja stabilizacji cen energii? Metody: W rozdziale zastosowano wieloaspektową analizę jakościową, obejmującą przegląd literatury naukowej i raportów instytucjonalnych (m.in. IEA, IRENA), analizę danych statystycznych oraz studia przypadków. Porównano korzyści i potencjalne zagrożenia wynikające z rozwoju fotowoltaiki pod kątem bezpieczeństwa energetycznego, uwzględniając m.in. scenariusze kryzysowe, bariery surowcowe i nowe wyzwania regulacyjne.

Słowa kluczowe: zaawansowane systemy fotowoltaiczne, bezpieczeństwo energetyczne, odnawialne źródła energii

IRENA), statistical data analysis, and case studies. Benefits and potential risks related to PV development are compared from the perspective of energy security, accounting for crisis scenarios, material supply barriers, and emerging regulatory challenges.

Keywords: advanced photovoltaic systems, energy security, renewable energy sources

Wstęp

Bezpieczeństwo energetyczne jest jednym z kluczowych wymiarów polityki gospodarczej i narodowej, oznaczając zdolność państwa do zapewnienia nieprzerwanego dostępu do energii po akceptowalnej cenie oraz ochrony przed zakłóceniami dostaw[1]. Koncepcja ta tradycyjnie wiązała się z zabezpieczeniem dostaw paliw kopalnych (ropy, gazu, węgla) i stabilnością sieci elektroenergetycznej. Współcześnie nabiera ona nowego znaczenia w obliczu transformacji energetycznej i dążenia do gospodarki niskoemisyjnej. Rozwój odnawialnych źródeł energii, w tym energetyki słonecznej, oferuje szansę na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego poprzez dywersyfikację źródeł i uniezależnienie się od importowanych surowców. Jednocześnie transformacja ta wiąże się z nowymi wyzwaniami technologicznymi i geopolitycznymi, takimi jak zależność od dostaw komponentów i minerałów krytycznych czy konieczność zapewnienia elastyczności systemu z dużym udziałem źródeł

[1] International Energy Agency (IEA). Energy Security. [Online]. Dostęp: IEA Topics – Energy Security (2025).

zależnych od warunków pogodowych. Według raportu REN21, światowe inwestycje w odnawialne źródła energii wzrosły w 2022 roku do rekordowych 0,5 bln USD, co odzwierciedla priorytetowe traktowanie OZE jako elementu bezpieczeństwa energetycznego[2]. Fotowoltaika (PV) stała się w ostatnich dekadach jednym z najszybciej rozwijających się źródeł energii elektrycznej. Globalna moc zainstalowana PV przekroczyła 1,6 TW w 2023 roku (wzrost z 1,2 TW w 2022)[3], a energia słoneczna odpowiada już za ponad 5% światowej produkcji elektryczności[4]. Spadające koszty technologii – energia z dużych instalacji PV jest dziś najtańszym źródłem energii elektrycznej w wielu regionach – sprawiły, że fotowoltaika odgrywa główną rolę w nowych inwestycjach energetycznych[5]. Jednocześnie, wraz z rosnącym znaczeniem PV, pojawia się pytanie, w jaki sposób zaawansowane systemy fotowoltaiczne mogą przyczynić się do wzmocnienia bezpieczeństwa energetycznego państwa. Zaawansowane systemy fotowoltaiczne to pojęcie obejmujące nowoczesne technologie ogniw słonecznych, zintegrowane systemy magazynowania energii, inteligentne układy sterowania oraz innowacyjne zastosowania fotowoltaiki (np. agrifotowoltaika, systemy wyspowe, fotowoltaika zintegrowana z budynkami). Celem niniejszego rozdziału jest zbadanie, w jaki sposób takie zaawansowane rozwiązania fotowoltaiczne mogą stać się kluczowym czynnikiem wzmacniającym bezpieczeństwo energetyczne kraju. Wprowadzenie przedstawia ogólny kontekst bezpieczeństwa energetycznego i roli fotowoltaiki w transformacji energetycznej. W dalszych częściach zdefiniowano cel i problem badawczy, opisano zastosowane metody, dokonano przeglądu zaawansowanych technologii PV oraz przeanalizowano ich wpływ na różne aspekty bezpieczeństwa energetycznego (dywersyfikację dostaw, odporność systemu, niezależność energetyczną itp.), jak również zidentyfikowano wyzwania i wymagania związane z integracją fotowoltaiki na wielką skalę.

Celem rozdziału jest analiza wpływu zaawansowanych systemów fotowoltaicznych na bezpieczeństwo energetyczne państwa. W szczególności dążono do:

[2] REN21. Renewables 2023 Global Status Report. Paryż: REN21 Secretariat, 2023.

[3] IEA Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS). Snapshot of Global PV Markets 2023. Report IEA-PVPS T1-42:2024, April 2024.

[4] A. K. Pandey, V. V. Tyagi, J. Selvaraj, N. A. Rahim, S. K. Tyagi, *Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 53, 2016.

[5] International Energy Agency (IEA). Solar PV – Analysis and Forecasts 2023.

- scharakteryzowania najnowszych osiągnięć technologicznych w fotowoltaice oraz koncepcji zaawansowanych systemów PV (np. wysokosprawne ogniwa, magazyny energii, mikrosieci),
- oceny, w jaki sposób rozwój i wdrożenie tych rozwiązań może przyczynić się do wzmocnienia bezpieczeństwa energetycznego (rozumianego jako pewność, dostępność i odporność dostaw energii),
- zidentyfikowania głównych korzyści oraz potencjalnych ryzyk związanych z wysokim udziałem energii słonecznej w miksie energetycznym kraju,
- sformułowania rekomendacji dotyczących działań wspierających wykorzystanie zaawansowanej fotowoltaiki dla zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego.

Realizacja powyższego celu wymagała zarówno studium literatury i danych empirycznych, jak i przeprowadzenia krytycznej analizy obecnych trendów technologicznych oraz politycznych związanych z energetyką słoneczną.

Główny problem badawczy podjęty w rozdziale można sformułować następująco: w jaki sposób zaawansowane systemy fotowoltaiczne wpływają na bezpieczeństwo energetyczne państwa i czy mogą stanowić kluczowy czynnik jego wzmocnienia? Innymi słowy, badanie koncentruje się na zależności między rozwojem nowoczesnej fotowoltaiki a zdolnością kraju do zabezpieczenia stabilnych, pewnych dostaw energii[6,7].

Szczegółowe pytania badawcze obejmują:

- Jakie innowacje technologiczne w obszarze fotowoltaiki (np. nowe materiały i konstrukcje ogniw, integracja z magazynami) zwiększają efektywność i niezawodność produkcji energii słonecznej?
- Czy i w jakim stopniu wysoki udział energetyki słonecznej może zastąpić tradycyjne źródła energii i ograniczyć zależność od importu paliw kopalnych?
- Jak zaawansowane systemy PV (np. systemy z magazynowaniem, mikroinstalacje prosumenckie, inteligentne sieci) wpływają na odporność

[6] Ch. Lamnatou, C. Cristofari, D. Chemisana. *Artificial Intelligence (AI) in relation to environmental life-cycle assessment, photovoltaics, smart grids and small-island economies*, Sustainable Energy Technologies and Assessments 71, 2024.

[7] S. Tsuchida, H. Nonaka, N. Yamada, *Deep Reinforcement Learning for the Optimal Angle Control of Tracking Bifacial Photovoltaic Systems,* Energies 15, 2022.

systemu elektroenergetycznego na zakłócenia (klęski żywiołowe, kryzysy geopolityczne, cyberataki)?
- Jakie bariery (techniczne, ekonomiczne, surowcowe) mogą ograniczać potencjał fotowoltaiki w kontekście bezpieczeństwa energetycznego i jak można im przeciwdziałać?

Rozwiązanie postawionego problemu badawczego ma dostarczyć odpowiedzi, czy zaawansowana fotowoltaika może pełnić rolę „bezpiecznika" krajowego systemu energetycznego w XXI wieku oraz jakie działania należy podjąć, aby potencjał ten w pełni wykorzystać.

Przeprowadzona praca ma charakter interdyscyplinarnej analizy łączącej perspektywę technologiczną i strategiczną. Zastosowano jakościową metodę badawczą opartą na przeglądzie literatury przedmiotu oraz danych wtórnych z raportów branżowych i analiz rządowych. W pierwszej fazie dokonano przeglądu aktualnych publikacji naukowych i raportów międzynarodowych instytucji (m.in. Międzynarodowej Agencji Energii – IEA, Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej – IRENA) dotyczących[8,9]:

- definicji i czynników składowych bezpieczeństwa energetycznego (w tym klasycznych koncepcji „4A" – availability, accessibility, affordability, acceptability) oraz zmian podejścia do bezpieczeństwa energetycznego w dobie transformacji energetycznej[10],
- stanu rozwoju i trendów w technologii fotowoltaicznej (efektywności ogniw, kosztów, skali wdrożeń) na świecie[11],
- przykładów zastosowań zaawansowanych systemów PV (projekty pilotażowe, wdrożenia magazynów energii, mikrosieci z PV, systemy zwiększające odporność na awarie),
- badań nad wpływem rozwoju OZE (w szczególności PV) na wskaźniki bezpieczeństwa energetycznego państw[12].

[8] J. H. Sanchez, L. M. Castro, *Advanced three-stage photovoltaic system phasor model for grid integration dynamic studies*, Solar Energy, 235, 2022.

[9] H. Katir, A. Abouloifa, I. Lachkar, K. Noussi, F. Giri, J. M. Guerrero, *Advanced Nonlinear Control of A Grid-Connected Photovoltaic Power System Using N-Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters*, IFAC PapersOnLine 53-2, 2020.

[10] International Energy Agency (IEA). *Energy Security*. [Online]. Dostęp: IEA Topics – Energy Security, 2025.

[11] International Energy Agency (IEA). Solar PV – Analysis and Forecasts, 2023.

[12] K. Khan, A. Khurshid, J. Cifuentes-Faura, D. Xianjun, *Does renewable energy development enhance energy security?* Utilities Policy, vol. 87, 2024.

W kolejnym etapie dokonano analizy porównawczej korzyści i ryzyk związanych z integracją fotowoltaiki w systemie energetycznym. Wykorzystano podejście analizy scenariuszowej, odnosząc się do sytuacji kryzysowych (np. nagłe przerwy dostaw paliw) i roli, jaką mogłaby odegrać generacja słoneczna. W tym celu przeanalizowano studia przypadków, m.in.:

- dane z Unii Europejskiej w okresie kryzysu gazowego 2021–2022, kiedy rekordowa generacja z PV latem 2022 pozwoliła zaoszczędzić znaczące wolumeny gazu ziemnego[13],
- inicjatywy zwiększania odporności systemu poprzez PV i magazyny energii (np. projekty mikrosieci na potrzeby wojskowe i infrastruktury krytycznej w USA)[14],
- programy wspierające integrację magazynowania z OZE (np. program SHINES Departamentu Energii USA[15], których celem jest stworzenie skalowalnych i opłacalnych systemów integrujących PV z magazynowaniem, zdolnych do niezawodnej pracy przy wysokim udziale OZE) oraz rozwiązania z zakresu inteligentnych sieci pozwalające na sterowanie popytem i podażą energii.

Zebrane informacje poddano krytycznej analizie, stosując metody wnioskowania dedukcyjnego. Na tej podstawie sformułowano syntezę dotyczącą wpływu zaawansowanej fotowoltaiki na bezpieczeństwo energetyczne oraz rekomendacje. W rozdziale wykorzystano również dwie ilustracje techniczne (rysunki) oraz dwie tabele zestawiające dane i wyniki analizy, celem lepszego zilustrowania omawianych zagadnień.

Zaawansowane technologie i systemy fotowoltaiczne

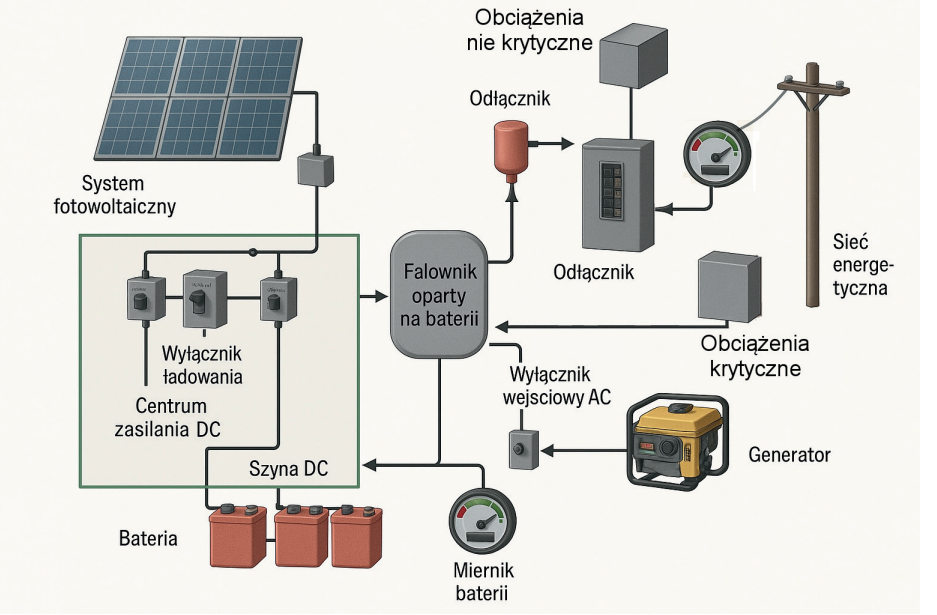
Dynamiczny rozwój technologii fotowoltaicznych w ostatnich latach doprowadził do powstania szeregu zaawansowanych rozwiązań PV, które charakteryzują się wyższą wydajnością, większą elastycznością zastosowań oraz lepszą integracją z siecią elektroenergetyczną. Poniżej omówiono wybrane kierunki postępu w fotowoltaice:

[13] V. Masterson, *Here's how solar energy saved Europeans $29 billion this summer*, World Economic Forum, 3 października 2022.

[14] American Council on Renewable Energy (ACORE). The Role of Renewable Energy in National Security. Issue Brief, October, 2018.

[15] U.S. Department of Energy (DOE). Sustainable and Holistic Integration of Energy Storage and Solar PV (SHINES). [Online] 2016.

- Nowe materiały i wysokosprawne ogniwa PV: Tradycyjne krystaliczne ogniwa krzemowe, dominujące na rynku, osiągnęły sprawności rzędu 20–22% w produkcji masowej, a rekord laboratoryjny przekroczył 26%. Obecnie intensywnie rozwijane są ogniwa wielozłączowe oraz tandemowe, łączące krzem z innymi półprzewodnikami. Przykładem jest tandem perowskitowo-krzemowy, w którym warstwa perowskitu uzupełnia widmo absorpcji krzemu. Najnowsze prototypy tego typu ogniw osiągnęły sprawność konwersji na poziomie 34,6%[16], przekraczając teoretyczny limit pojedynczego złącza i znacząco przewyższając wydajność konwencjonalnych ogniw krzemowych. Rysunek 1 ilustruje schemat zaawansowanego systemu PV zintegrowanego z magazynem energii, pozwalającego na bardziej stabilną generację energii.



Rysunek 1. Schemat zaawansowanego systemu fotowoltaicznego z magazynem energii, umożliwiającego pracę wyspową dla odbiorów krytycznych
Źródło: opracowanie własne.

Oprócz tandemów perowskitowych rozwijane są ogniwa z arsenku galu i innych półprzewodników III-V, często w układach wielozłączowych

[16] V. Shaw, E. Bellini, *Longi achieves 34.6% efficiency for two-terminal tandem perovskite solar cell prototype*, PV Magazine International, 2024.

stosowanych pod koncentratorami światła – osiągnęły one rekordowe sprawności ponad 45% (w warunkach koncentracji), choć na razie wykorzystuje się je głównie w zastosowaniach kosmicznych ze względu na wysoki koszt. Równolegle udoskonalane są technologie cienkowarstwowe (np. CdTe, CIGS), które choć ustępują krzemowi pod względem sprawności (komercyjnie ok. 15-18%), oferują inne zalety – niższy koszt jednostkowy w niektórych zastosowaniach i lepsze działanie w rozproszonym świetle. Rozwój zaawansowanych modeli i narzędzi AI znacząco usprawnia projektowanie i optymalizację ogniw PV[17,18].

- Magazynowanie energii i hybrydowe systemy PV: Samodzielne systemy fotowoltaiczne generują energię w sposób zależny od nasłonecznienia (z cyklem dziennym i sezonowym), co stanowi wyzwanie dla bilansowania sieci. Wprowadzenie magazynów energii (najczęściej w postaci baterii litowo-jonowych) w zaawansowanych instalacjach PV umożliwia gromadzenie nadwyżek energii w okresach wysokiej produkcji i wykorzystywanie ich w godzinach braku słońca. Dzięki temu energia słoneczna staje się bardziej dyspozycyjna – może pokrywać zapotrzebowanie również wieczorem czy w nocy, zwiększając pewność zasilania. Technologie takie są rozwijane m.in. w ramach programów typu SHINES (Sustainable and Holistic Integration of Energy Storage and Solar PV) Departamentu Energii USA[19], których celem jest stworzenie skalowalnych i opłacalnych systemów integrujących PV z magazynowaniem, zdolnych do niezawodnej pracy przy wysokim udziale OZE. Coraz częściej duże farmy fotowoltaiczne budowane są od razu jako *systemy hybrydowe PV+magazyn*, co pozwala operatorom oferować usługę zbliżoną charakterem do elektrowni konwencjonalnej – dostarczanie mocy według zapotrzebowania, a nie tylko w trybie pasywnym zależnym od pogody. W ostatnich latach

[17] H. Togun, A. Basem, M. J. Jweeg, N. Biswas, A. M. Abed, D. Paul, H. I. Mohammed, A. Chattopadhyay, B. K. Sharma, T. Abdulrazzaq, *Advancing organic photovoltaic cells for a sustainable future: The role of artificial intelligence (AI) and deep learning (DL) in enhancing performance and innovation*, Solar Energy, 291, 2025.

[18] R. Abbassi, S. Saidi, H. Jerbi, L. Ladhar, M. Omri, *Accurate parameters extraction of photovoltaic models using Lambert W-function collaborated with AI-based Puma optimization method*, Results in Engineering, 25, 2025.

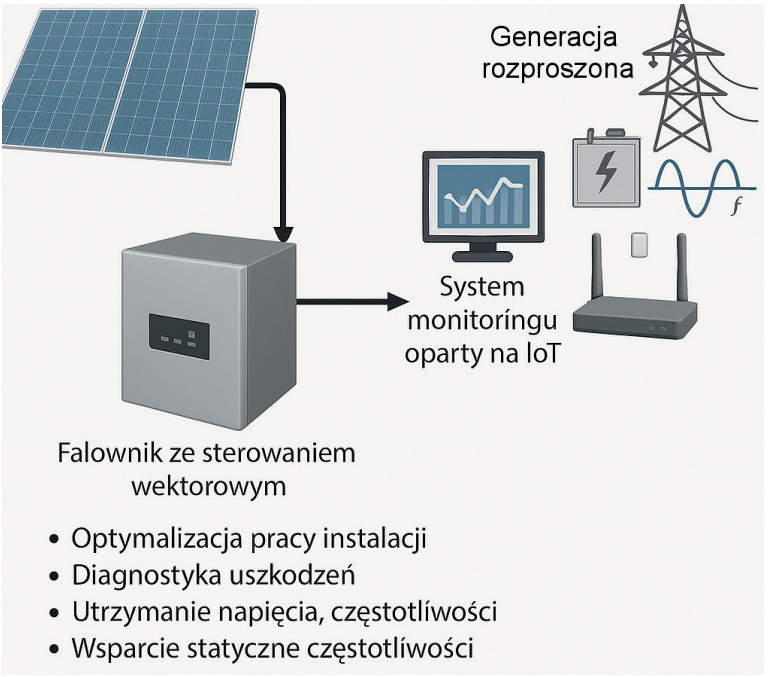
[19] U.S. Department of Energy (DOE). Sustainable and Holistic Integration of Energy Storage and Solar PV (SHINES). [Online]. 2016.

pojawiają się systemy kojarzące fotowoltaikę z akumulacją energii cieplnej bądź sprężonego powietrza, sterowane narzędziami AI[20,21].

- Inteligentne systemy sterowania i monitoringu: Zaawansowane systemy PV wyposażone są w nowoczesne układy energoelektroniczne (np. falowniki ze sterowaniem wektorowym – rysunek 2) oraz systemy monitoringu oparte na IoT. Pozwala to na bieżącą optymalizację pracy instalacji, diagnostykę uszkodzeń, a także udział generacji rozproszonej w usługach regulacyjnych sieci (utrzymanie napięcia, częstotliwości). Przykładowo, *inteligentne falowniki* mogą automatycznie redukować moc lub przesuwać punkt pracy ogniw, aby zapobiegać przeciążeniom sieci lokalnej, oraz dostarczać usługę *statycznego wsparcia częstotliwości* przez chwilowe oddawanie energii zgromadzonej w kondensatorach. Zaawansowane systemy nadzoru umożliwiają też szybkie reagowanie na awarie – monitorując tysiące modułów można z wyprzedzeniem wykrywać anomalie wskazujące np. na degradację paneli czy problemy z okablowaniem. Ponadto, integracja z systemami zdalnego sterowania (SCADA) i wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji do prognozowania nasłonecznienia zwiększa przewidywalność i efektywność wykorzystania PV.

[20] J. Brinkley, L. Jiang, B. Widyolar, S. K. Hota, Y. Bhusal, G. Diaz, R. Winston, *Thermal, electrical, and cost study of advanced optical photovoltaic thermal system (ADOPTS)*, Applied Energy, 269, 2020.

[21] E. Assareh, A. Keykhah, A. Bedakhanian, N. Agarwal, M. Lee, *Optimizing solar photovoltaic farm-based cogeneration systems with artificial intelligence (AI) and Cascade compressed air energy storage for stable power generation and peak shaving: A Japan-focused case study*, Applied Energy, 377, 2025.



Rysunek 2. Schemat zaawansowanego systemu fotowoltaicznego z falownikiem ze sterowaniem wektorowym)

Źródło: opracowanie własne.

- Innowacyjne aplikacje fotowoltaiki: W zakresie zastosowań fotowoltaika wykracza poza tradycyjne farmy naziemne i dachowe systemy prosumenckie. Pojawiają się systemy agrofotowoltaiczne, łączące produkcję rolną z energią (panele nad uprawami), fotowoltaika zintegrowana z infrastrukturą (np. panele jako elementy fasad budynków, ekranów akustycznych, zadaszeń parkingów) oraz pływające farmy PV na zbiornikach wodnych, zmniejszające problem zajmowania cennych gruntów. Te innowacje poszerzają możliwości implementacji PV, przyczyniając się do zwiększenia potencjału generacji słonecznej w skali kraju. Co istotne, wiele z tych rozwiązań sprzyja rozproszeniu źródeł – np. instalacje BIPV (Building Integrated PV) umożliwiają włączenie produkcji energii w strukturę miast, co ma znaczenie dla odporności systemu (trudniej o awarię jednocześnie wszystkich rozproszonych źródeł).

Tabela 1 przedstawia porównanie wybranych zaawansowanych technologii fotowoltaicznych pod kątem ich sprawności i charakterystyki. Zestawienie to obrazuje, że osiągane obecnie w laboratoriach sprawności znacząco

przekraczają dotychczasowe standardy komercyjne, co otwiera drogę do przyszłych, jeszcze wydajniejszych systemów PV.

Tabela 1. Charakterystyka wybranych technologii ogniw fotowoltaicznych

Technologia PV	Sprawność lab. (rekord)	Sprawność komercyjna	Status i zastosowania
Monokrystaliczny krzem (c-Si)	ok. 26,7%	20–22%	Dominująca na rynku, dojrzała technologia; dalsze ulepszenia poprzez ogniwa typu PERC, TOPCon, HJT.
Cienkowarstwowa (CdTe, CIGS)	ok. 22%	15–18%	Tańsze materiały, niższa sprawność; stosowane głównie w farmach wielkopowierzchniowych.
Tandem perowskit + c-Si	33–35%	~30% (pilotażowo)	Technologia w fazie badań i wdrożeń demonstracyjnych; duży potencjał wzrostu sprawności modułów.
Wielozłączowe III-V (koncentrator)	>45% (koncentracja)	~30–35% (bez koncentr.)	Najwyższe sprawności przy skoncentrowanym świetle; zastosowania specjalistyczne (kosmos, CPV).

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych NREL, PV Magazine i komunikatów producentów[22,23].

Warto podkreślić, że ciągły postęp technologiczny w fotowoltaice przekłada się nie tylko na wyższą efektywność konwersji energii promieniowania słonecznego, ale także na obniżenie kosztów oraz wzrost niezawodności systemów. W latach 2010-2023 średni koszt energii z instalacji PV spadł o kilkadziesiąt procent, co czyni fotowoltaikę jednym z najbardziej konkurencyjnych źródeł energii [24]. Dzięki temu kraje mogą szybciej zwiększać swój potencjał mocy słonecznej, co – jak omówiono w następnych sekcjach – ma istotne implikacje dla bezpieczeństwa energetycznego.

Fotowoltaika a bezpieczeństwo energetyczne państwa

Rozwój energetyki słonecznej wpływa na bezpieczeństwo energetyczne państwa w wielu wymiarach. Poniżej przeanalizowano, jak zaawansowane systemy fotowoltaiczne przyczyniają się do wzmocnienia (oraz jakie stwarzają

[22] International Energy Agency (IEA). Energy Security. [Online]. Dostęp: IEA Topics – Energy Security, 2025.

[23] V. Shaw, E. Bellini, *Longi achieves 34.6% ...*, op. cit.

[24] International Energy Agency (IEA). Solar PV – Analysis and Forecasts 2023. [Online]. IEA, 2024.

wyzwania dla) bezpieczeństwa energetycznego, odnosząc się do głównych składowych tego pojęcia.

Dywersyfikacja źródeł energii i niezależność od importu. Tradycyjnie bezpieczeństwo energetyczne było zagrożone przez nadmierną zależność od importowanych paliw kopalnych. Wprowadzenie znaczącego udziału krajowej energii słonecznej do miksu zmniejsza tę zależność. Fotowoltaika korzysta z *niewyczerpalnego, lokalnego zasobu*, jakim jest promieniowanie słoneczne – w przeciwieństwie do paliw, których zasoby są skoncentrowane geograficznie i podlegają wahaniom podaży na rynkach światowych. Każda megawatogodzina energii wyprodukowana ze słońca to odpowiednio mniej zużytego gazu czy węgla, co przekłada się na mniejszą wrażliwość państwa na szoki podażowe i skoki cen surowców. Przykładowo, w Unii Europejskiej rekordowa generacja słoneczna latem 2022 (99,4 TWh w okresie maj–sierpień) pozwoliła uniknąć zakupu ok. 20 mld m³ gazu ziemnego, co odpowiadało oszczędności około 29 mld USD[25]. Było to kluczowe w obliczu kryzysu wywołanego ograniczeniem dostaw z Rosji – energia słoneczna złagodziła niedobory i wysokie ceny gazu. Rządy wielu państw zauważyły tę rolę PV: polityki UE (np. plan REPowerEU) zakładają przyspieszenie inwestycji w OZE jako element uniezależnienia się od importu paliw z niestabilnych kierunków.

Dostępność i pewność dostaw energii. Bezpieczeństwo energetyczne to nie tylko kwestia geopolityki dostaw, ale także zdolność do pokrycia krajowego zapotrzebowania na energię w sposób ciągły, nawet w sytuacjach nadzwyczajnych. Rozproszone systemy fotowoltaiczne zwiększają *dyspozycyjność mocy* w kraju poprzez dodanie wielu niezależnych źródeł generacji. W odróżnieniu od wielkich elektrowni, których awaria lub wyłączenie (np. z powodu usterki albo ataku) może pozbawić system znaczącej części mocy, setki tysięcy rozsianych instalacji PV tworzą system bardziej *modularny i odporny*. Uszkodzenie pojedynczych instalacji (np. wskutek ekstremalnej pogody) ma relatywnie niewielki wpływ na całość generacji słonecznej. Dodatkowo, fotowoltaika może funkcjonować w skali mikro – zasilając *mikrosieci* lub obiekty autonomiczne. Takie rozwiązania są szczególnie cenne dla zasilania infrastruktury krytycznej w sytuacjach kryzysowych. Na przykład baza wojskowa lub szpital wyposażony we własną elektrownię PV z magazynem może zachować zasilanie nawet w razie blackoutu w sieci głównej. Już w 2018 r. Pentagon

[25] V. Masterson, *Here's how solar energy saved Europeans $29 billion this summer*, World Economic Forum, 2022.

wskazywał, że łączenie odnawialnych źródeł z magazynami w formie samowystarczalnych mikro-sieci zwiększa odporność operacyjną baz wojskowych i stanowi element bezpieczeństwa narodowego USA[26].

Stabilność cenowa i dostępność ekonomiczna energii. IEA definiuje bezpieczeństwo energetyczne także poprzez kryterium *przystępności cenowej* energii[27]. W tym kontekście fotowoltaika odgrywa pozytywną rolę, gdyż nie generuje kosztów paliwa – raz zainstalowane moduły produkują energię praktycznie za darmo przez 25 i więcej lat. To chroni odbiorców przed ryzykiem gwałtownych wzrostów cen paliw kopalnych. Doświadczenie z lat 2021–2022, gdy ceny gazu i węgla na rynkach światowych gwałtownie wzrosły, pokazuje, że kraje z większym udziałem OZE były mniej narażone na przenoszenie się tych wzrostów na ceny energii dla przemysłu i gospodarstw domowych. Energia słoneczna działa zatem stabilizująco na rynek – zwiększając podaż energii o niskim koszcie krańcowym, obniża hurtowe ceny energii elektrycznej w okresach wysokiej generacji (zjawisko tzw. *merit order effect*). Co więcej, inwestycje w fotowoltaikę są coraz bardziej opłacalne rynkowo – w wielu regionach świata koszt produkcji 1 kWh z PV jest obecnie niższy niż z nowych elektrowni węglowych czy gazowych[28]. Dla państwa oznacza to mniejsze obciążenie bilansu handlowego (mniej wydatków na import paliw) oraz korzyści dla gospodarki poprzez rozwój nowego sektora technologicznego.

Odporność infrastruktury energetycznej. Rosnąca częstotliwość ekstremalnych zjawisk pogodowych (burze, fale upałów, mrozy) oraz zagrożenia takie jak cyberataki każą zwracać uwagę na *odporność* (resilience) systemu energetycznego. Zaawansowane systemy PV mogą tę odporność zwiększać, o ile są odpowiednio projektowane. Badania wykazały, że instalacje fotowoltaiczne mogą przetrwać nawet gwałtowne zjawiska – np. w kampusie NREL w Kolorado gradobicie w 2017 r. uszkodziło tylko 1 z 3000 paneli[29]. Kluczowe jest jednak posiadanie lokalnych źródeł energii na wypadek rozległych awarii sieci – i tu rozproszone PV wraz z magazynami stanowią rozwiązanie. Np. portorykańskie projekty *solarnych mikrosieci* były rozwijane po huraganie

[26] American Council on Renewable Energy (ACORE). The Role of Renewable Energy in National Security. Issue Brief, October 2018.

[27] International Energy Agency (IEA). Energy Security. [Online]. Dostęp: IEA Topics – Energy Security, 2025.

[28] American Council on Renewable Energy (ACORE). The Role of Renewable Energy in National Security. Issue Brief, 2018.

[29] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Resilient Solar Photovoltaics. [Online]. Dostęp: NREL Security & Resilience, 2024.

Maria, aby społeczności lokalne mogły szybciej odzyskać zasilanie po klęsce żywiołowej. Rysunek 3 pokazuje przykładową niewielką instalację dachową PV w budynku jednorodzinnym – takie mikroinstalacje, w połączeniu z magazynem, zwiększają indywidualne bezpieczeństwo energetyczne gospodarstw domowych, ograniczając ich zależność od zewnętrznej sieci. Z punktu widzenia odporności, ważnym aspektem jest także *cyberbezpieczeństwo*. Paradoksalnie, rozproszenie źródeł zmniejsza ryzyko fizycznych zniszczeń, ale pojawia się nowe zagrożenie – tysiące inteligentnych urządzeń sterujących PV mogą stać się celem ataku hakerskiego. Jeśli są one połączone w sieci i sterowane zdalnie, skoordynowany atak mógłby zakłócić ich pracę. Eksperci ostrzegają, że przy wysokim udziale fotowoltaiki potencjalny cyberatak wyłączający dużą liczbę falowników mógłby doprowadzić do znacznych niedoborów energii elektrycznej[30]. Dlatego rozwój zaawansowanych systemów PV musi iść w parze z zabezpieczeniami informatycznymi i protokołami chroniącymi przed przejęciem kontroli nad urządzeniami (szyfrowana komunikacja, standardy bezpieczeństwa IoT, możliwość odizolowania i ręcznego sterowania w razie incydentu). Wymaga to nowych regulacji i standardów – rządy już dostrzegają ten problem i zaczynają opracowywać wytyczne dla cyberbezpieczeństwa OZE.



Rysunek 3. Przykładowa mikroinstalacja fotowoltaiczna prosumencka na dachu budynku mieszkalnego

Źródło: opracowanie własne.

[30] *Panele fotowoltaiczne potencjalną furtką dla cyberprzestępców?* Energetyka24.com, 2021.

Akceptowalność środowiskowa i społeczna. Bezpieczeństwo energetyczne bywa definiowane również poprzez *akceptowalność społeczną* źródeł energii (np. w ramach koncepcji 4A uwzględnia się „acceptability")[31]. Fotowoltaika jako czyste źródło energii sprzyja bezpieczeństwu w długim horyzoncie poprzez ograniczanie zmian klimatu – a te stanowią rosnące zagrożenie dla stabilności dostaw energii (np. susze zagrażające energetyce wodnej, ocieplenie wpływające na zapotrzebowanie szczytowe). Redukcja emisji CO2 dzięki PV (w Polsce 1 kWh z PV to ok. 700 g CO2 mniej w porównaniu z węglem) przyczynia się zatem pośrednio do łagodzenia ryzyka klimatycznego. Ponadto, energia słoneczna cieszy się na ogół wysoką akceptacją społeczną – instalacje PV są postrzegane jako nieuciążliwe, bezpieczne i korzystne dla lokalnych społeczności (w przeciwieństwie np. do obaw związanych z energetyką jądrową czy wydobyciem gazu łupkowego). To ułatwia rozwój fotowoltaiki i zmniejsza napięcia społeczne wokół infrastruktury energetycznej, co również jest elementem bezpieczeństwa (mniejsze ryzyko protestów, wstrzymania inwestycji itp.).

Powyższe punkty pokazują wielowymiarowy pozytywny wpływ PV na bezpieczeństwo energetyczne. Dla pełnego obrazu należy jednak rozważyć także ograniczenia i warunki, od których spełnienia zależy realne wykorzystanie tego potencjału.

Wyzwania integracji fotowoltaiki w systemie energetycznym

Mimo licznych zalet, duży wzrost udziału fotowoltaiki w systemie niesie też wyzwania, które należy adresować, aby nie osłabiły one bezpieczeństwa energetycznego. Do najważniejszych należą:

- Zmienność i nieprzewidywalność generacji: Produkcja PV zależy od pory dnia i warunków pogodowych, co oznacza, że bezpośrednio nie zapewnia ciągłości dostaw przez 24 godziny na dobę. Przy wysokiej penetracji PV system wymaga odpowiednich mechanizmów równoważenia – elastycznych rezerw mocy, magazynów energii lub sterowania popytem. Brak takich środków mógłby skutkować niedoborami mocy w nocy lub w pochmurne dni. Na szczęście rozwój technologii magazynowania energii postępuje szybko – koszt baterii spada, a ich zastosowanie

[31] International Energy Agency (IEA). Energy Security. [Online]. Dostęp: IEA Topics – Energy Security, 2025.

jest kluczowe dla zapewnienia stabilności dostaw[32]. Również *zarządzanie popytem* (DSM) i zwiększenie elastyczności po stronie odbiorców może zmniejszyć to ryzyko (np. programy zachęcające do zużycia energii w środku dnia, gdy pracuje PV). Przyszły bezpieczny system energetyczny z dużym udziałem słońca wymaga więc równoległych inwestycji w magazyny i inteligentną infrastrukturę sieciową.

- Potrzeba rozbudowy i modernizacji sieci: Generacja słoneczna jest często zlokalizowana w innych punktach niż tradycyjne elektrownie (np. na niższych poziomach napięć rozdzielczych). Aby bezpiecznie zasilać system, sieci przesyłowe i dystrybucyjne muszą być dostosowane do dwukierunkowych przepływów energii i zmiennych poziomów obciążenia. Konieczne są inwestycje w infrastrukturę (transformatory, linie, systemy sterowania), by uniknąć przeciążeń i zapewnić możliwość odbioru mocy ze słońca w okresach jej szczytu. Wymaga to nakładów finansowych i planowania przestrzennego (np. budowy farm PV tam, gdzie sieć ma wystarczające moce przesyłowe lub ich wzmocnienia tam, gdzie powstają nowe duże inwestycje PV).
- Zależność od dostaw komponentów i surowców: Paradoksalnie, uniezależniając się od importu ropy czy gazu, państwa mogą popaść w nową zależność – od importu paneli fotowoltaicznych, baterii lub surowców do ich produkcji. Obecnie ok. 80-90% globalnych mocy produkcyjnych modułów PV znajduje się w jednym kraju (Chiny). Taka koncentracja łańcucha dostaw stanowi potencjalne ryzyko geopolityczne (np. cła, ograniczenia eksportowe, zakłócenia transportu). Ponadto produkcja paneli wymaga szeregu *minerałów krytycznych* – krzemu wysokiej czystości, srebra (na elektrody), indu, telluru (dla niektórych technologii cienkowarstwowych), a magazyny energii potrzebują litu, kobaltu, niklu itp. IEA ostrzega, że przy obecnych trendach popyt na te surowce dla energetyki odnawialnej wzrośnie wielokrotnie, grożąc niedoborami, jeśli nie zwiększą się inwestycje w ich wydobycie i przetwórstwo[33]. Dla bezpieczeństwa energetycznego istotna jest zatem strategia zapewnienia dostępu do tych kluczowych materiałów – poprzez dywersyfikację dostaw, rozwój własnych mocy produkcyjnych (np. fabryk paneli w kraju lub regionie),

[32] D. Papathanasiou, *Why energy storage matters for the global energy transition*, *World Bank Blogs*, 2023.

[33] International Energy Agency (IEA). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paryż: IEA, 2021.

a także recykling zużytych instalacji w przyszłości. Unia Europejska już podejmuje działania w tym kierunku, ogłaszając inicjatywy na rzecz rozwoju rodzimego przemysłu PV i łańcuchów dostaw (np. European Solar Initiative).

- Wymogi regulacyjne i rynkowe: Aby zaawansowane systemy PV mogły faktycznie wzmocnić bezpieczeństwo systemu, potrzebne są odpowiednie ramy prawne i rynkowe. Przykładowo, usługi systemowe (rezerwa mocy, regulacja częstotliwości) muszą być tak zdefiniowane, aby mogły je świadczyć jednostki OZE z magazynami lub agregatorzy wielu mikroinstalacji (w formie *wirtualnych elektrowni*). Operatorzy systemów muszą z kolei zmienić podejście do planowania – więcej uwagi wymaga prognozowanie produkcji z OZE i zarządzanie ryzykiem pogodowym. W wielu krajach konieczne okazało się także dostosowanie struktur taryfowych i zasad rynku energii, by zachęcać do instalacji magazynów i elastyczności (np. taryfy czasowe, kontrakty typu PPA zapewniające stabilne ceny energii z PV dla odbiorców). Brak takich dostosowań mógłby hamować rozwój zaawansowanej fotowoltaiki lub prowadzić do problemów z bilansowaniem, co w efekcie zagrażałoby stabilności dostaw.

Tabela 2 syntetycznie porównuje konwencjonalny system oparty na paliwach kopalnych z systemem zdominowanym przez fotowoltaikę pod kątem kilku kluczowych aspektów bezpieczeństwa energetycznego.

Tabela 2. Porównanie wybranych aspektów bezpieczeństwa energetycznego w systemie tradycyjnym (paliw kopalnych) i systemie z dominującą fotowoltaiką

Aspekt	System konwencjonalny (kopalne)	System zdominowany przez PV
Zależność od surowców	Import paliw (ropa, gaz); ryzyko geopolitycznych zakłóceń	Zasoby lokalne (słońce); brak paliwa do importu
Ciągłość dostaw	Ciągła praca elektrowni, ale ryzyko awarii dużej jednostki	Zmienna generacja (dzień/noc); wymaga magazynów i rezerw
Koszty zmienne	Wysokie koszty paliwa, podatne na wahania cen	Brak kosztu paliwa; stabilne koszty operacyjne
Odporność na awarie	Uszkodzenie rafinerii/elektrowni poważne dla systemu	Rozproszona generacja; awarie lokalne mniej groźne
Infrastruktura sieci	Układ scentralizowany, przepływ jednostronny	Wymaga modernizacji dla dwukierunkowych przepływów i integracji prosumentów
Emisyjność	Wysoka (CO_2, zanieczyszczenia powietrza)	Znikoma podczas generacji; efekt klimatyczny pozytywny
Zagrożenia nowe	Zagrożenia fizyczne dostaw (ataki na infrastrukturę)	Zagrożenia cyfrowe (cyberataki na inteligentne systemy)

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z Tabeli 2, przejście od systemu konwencjonalnego do opartego na fotowoltaice znacząco zmienia profil ryzyka i charakter bezpieczeństwa energetycznego – większość zmian działa na korzyść (mniejsza zależność od importu, brak kosztów paliwa, niższe emisje), pojawiają się jednak nowe wyzwania (konieczność zapewnienia elastyczności, cyberbezpieczeństwo, zabezpieczenie łańcuchów dostaw technologii).

Wnioski

Przeprowadzona analiza wskazuje, że zaawansowane systemy fotowoltaiczne mogą pełnić rolę kluczowego filaru bezpieczeństwa energetycznego państwa, pod warunkiem podjęcia działań towarzyszących umożliwiających pełne wykorzystanie ich potencjału. Państwa, które wcześnie zainwestowały w rozwój OZE, czerpią już konkretne korzyści bezpieczeństwotwórcze. Dobrym przykładem jest transformacja energetyczna Niemiec – duży udział PV i wiatru znacząco obniżył import gazu w sektorze elektroenergetycznym, a jednocześnie zdywersyfikował miks energetyczny, utrudniając zastosowanie „broni energetycznej" przez dostawców surowców. Z kolei kraje takie jak, Dania czy Australia, gdzie udział fotowoltaiki (i generalnie OZE) w produkcji prądu sięga kilkudziesięciu procent, wypracowały rozwiązania integracyjne: systemy aukcyjne i magazynowe, mechanizmy wymiany międzysystemowej, które pozwalają zarządzać zmiennością źródeł odnawialnych bez utraty stabilności dostaw.

Istotnym wnioskiem z badań jest potwierdzenie tezy, że bezpieczeństwo energetyczne w erze odnawialnej wymaga myślenia *wielowymiarowego* i uwzględnienia nowych czynników. O ile dawniej dominowało podejście polegające na zabezpieczaniu szlaków dostaw ropy czy utrzymywaniu rezerw strategicznych paliw, o tyle dziś równorzędne znaczenie ma zabezpieczenie łańcuchów dostaw technologii (np. dostępność paneli, inwerterów, komponentów elektronicznych), jak również zdolność do zapewnienia elastyczności popytowo-podażowej (np. poprzez sieci inteligentne i magazyny energii). Polityka energetyczna musi więc rozszerzyć tradycyjne środki (magazynowanie ropy, dywersyfikacja dostaw gazu) o nowe elementy: wsparcie dla przemysłu OZE, inwestycje w badania nad alternatywami surowcowymi (recykling, zastępowanie rzadkich pierwiastków w konstrukcji paneli) oraz rozwój *międzynarodowych partnerstw technologicznych* zapewniających wymianę know-how i dostęp do komponentów. IRENA w swoim raporcie

„Geopolitics of the Energy Transformation" podkreśla, że w systemach opartych na odnawialnych źródłach dominującą rolę odgrywać będzie technologia, a nie paliwa – stąd odporność łańcuchów dostaw technologii staje się niezbędnym elementem bezpieczeństwa energetycznego. Podobnie Międzynarodowa Agencja Energii w raporcie World Energy Outlook 2022 przedstawiła dziesięć zasad wzmacniania bezpieczeństwa energetycznego w trakcie transformacji – nacisk położono na synchronizację przyspieszonego rozwoju czystych technologii z odchodzeniem od paliw kopalnych oraz na inwestycje w elastyczność i efektywność, aby przejście do systemu opartego na OZE było płynne i bezpieczne[34].

Z perspektywy strategicznej, zaawansowana fotowoltaika wpisuje się w koncepcję tzw. *bezpieczeństwa wielowymiarowego*. Jej rozwój jednocześnie wzmacnia filary klasyczne (dostępność i ciągłość dostaw), jak i wpisuje się w cele zrównoważonego rozwoju (łagodzenie zmian klimatu). W dobie, gdy zagrożenia dla bezpieczeństwa mogą wynikać z czynników ekologicznych czy pandemii (zaburzającej łańcuchy dostaw), posiadanie niezależnych, czystych źródeł energii stanowi element budowania odporności państwa na różnorodne kryzysy. Należy zauważyć, że przeprowadzone rozważania mają charakter ogólny i syntetyczny. Poszczególne aspekty wymagają pogłębionych badań ilościowych – np. modelowania systemowego określającego, ile MW magazynów potrzeba na każde 100 MW PV, by utrzymać wymagany poziom rezerwy mocy; czy analiz ekonomicznych optymalnego miksu źródeł. Niemniej, już teraz dostępne dane empiryczne potwierdzają kierunek wniosków: odnawialne źródła energii wzmacniają bezpieczeństwo energetyczne poprzez redukcję ryzyk starych (geopolitycznych, ekonomicznych), wprowadzając zarazem nowe wyzwania, którym jednak można sprostać poprzez odpowiednią politykę i postęp techniczny[35].

Podsumowanie

Zaawansowane systemy fotowoltaiczne stanowią obecnie jeden z najważniejszych czynników kształtujących przyszłe bezpieczeństwo energetyczne. Jak wykazano w rozdziale, szerokie wykorzystanie energii słonecznej – wsparte nowoczesnymi technologiami magazynowania i inteligentnego

[34] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2022. Paryż: IEA, 2022.

[35] K. Khan, A. Khurshid, J. Cifuentes-Faura, D. Xianjun, *Does renewable energy development enhance energy security?* Utilities Policy, vol. 87, 2024.

zarządzania – może znacząco podnieść zdolność państwa do samodzielnego zaspokojenia zapotrzebowania na energię w sposób stabilny, zrównoważony i odporny na zakłócenia. Do głównych korzyści zalicza się zwiększenie niezależności od zewnętrznych dostaw paliw (a tym samym ograniczenie wpływu napięć geopolitycznych na krajową energetykę), poprawę odporności infrastruktury dzięki rozproszeniu źródeł oraz stabilizację kosztów energii dla gospodarki. Z drugiej strony, transformacja w kierunku systemu opartego na fotowoltaice wymaga przezorności i inwestycji towarzyszących. Należy zabezpieczyć dostawy krytycznych materiałów i komponentów do budowy instalacji PV (poprzez dywersyfikację partnerów handlowych i rozwój rodzimego przemysłu). Konieczne jest również wdrożenie mechanizmów gwarantujących bilansowanie systemu – co obejmuje rozwój magazynów energii na szeroką skalę, interkonektorów międzysystemowych pozwalających dzielić się nadwyżkami OZE z sąsiadami, a także cyfrowych narzędzi zarządzania popytem. Wreszcie, cyberbezpieczeństwo i standaryzacja inteligentnych urządzeń muszą stać się integralną częścią strategii energetycznej.

Podsumowując, zaawansowana fotowoltaika pełni rolę katalizatora zmian sprzyjających bezpieczeństwu energetycznemu – ale jej pozytywny efekt nie zrealizuje się automatycznie. Wymaga to świadomej polityki: wspierania innowacji (aby nowe rekordy sprawności szybko przekładały się na komercyjne produkty), inwestycji w infrastrukturę oraz edukacji i akceptacji społecznej dla nowych rozwiązań (np. prosumenci, mikrosieci). Państwa, które odpowiednio wcześnie i kompleksowo wdrożą te działania, zyskają podwójnie: zapewnią sobie bezpieczeństwo dostaw energii oraz odegrają wiodącą rolę w globalnej transformacji energetycznej, czerpiąc z tego również korzyści gospodarcze.

Ostatecznym wnioskiem płynącym z przeprowadzonej analizy jest stwierdzenie, że fotowoltaika – wspierana przez zaawansowane technologie – nie tylko przyczynia się do dekarbonizacji, ale też staje się filarem bezpieczeństwa energetycznego nowoczesnego państwa. W dobie wyzwań klimatycznych i geopolitycznych, inwestycja w słońce okazuje się inwestycją w bezpieczeństwo i suwerenność energetyczną.

Literatura

1. Abbassi R., Saidi S., Jerbi H., Ladhar L., Omri M., *Accurate parameters extraction of photovoltaic models using Lambert W-function collaborated with AI-based Puma optimization method*, *Results in Engineering* 25, 2025.

2. American Council on Renewable Energy (ACORE). *The Role of Renewable Energy in National Security*. Issue Brief, October 2018.
3. Assareh E., Keykhah A., Bedakhanian A., N. Agarwal, M. Lee*, Optimizing solar photovoltaic farm-based cogeneration systems with artificial intelligence (AI) and Cascade compressed air energy storage for stable power generation and peak shaving: A Japan-focused case study*, Applied Energy 377, 2025.
4. Brinkley J., Jiang L., Widyolar B., Hota., S.K., Bhusal Y., Diaz G., Winston R., *Thermal, electrical, and cost study of advanced optical photovoltaic thermal system (ADOPTS)*, Applied Energy 269, 2020.
5. IEA Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS). *Snapshot of Global PV Markets 2023*. Report IEA-PVPS T1-42:2024, April 2024.
6. International Energy Agency (IEA). *Energy Security*. [Online]. Dostęp: IEA Topics – Energy Security, 2025.
7. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Geopolitics of the Energy Transformation: Energy Security*, 2023.
8. International Energy Agency (IEA). *Solar PV – Analysis and Forecasts 2023*. IEA, 2024.
9. International Energy Agency (IEA). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paryż: IEA, 2021.
10. International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2022*. Paryż: IEA, 2022.
11. Katir H., Abouloifa A., Lachkar I., Noussi K., Giri F., Guerrero J.M., *Advanced Nonlinear Control of A Grid-Connected Photovoltaic Power System Using N-Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters*, IFAC PapersOnLine 53-2, 2020.
12. Khan K., Khurshid A., Cifuentes-Faura J., Xianjun D., *Does renewable energy development enhance energy security?* Utilities Policy, vol. 87, 2024.
13. Lamnatou Ch., Cristofari C., Chemisana D., *Artificial Intelligence (AI) in relation to environmental life-cycle assessment, photovoltaics, smart grids and small-island economies*, Sustainable Energy Technologies and Assessments 71, 2024.
14. Masterson V., *Here's how solar energy saved Europeans $29 billion this summer*, World Economic Forum, 2022.
15. National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Resilient Solar Photovoltaics*. [Online]. NREL Security & Resilience. 2024.
16. Pandey A.K., Tyagi V.V., Selvaraj J., Rahim N.A., Tyagi S.K., *Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 53, 2016.
17. *Panele fotowoltaiczne potencjalną furtką dla cyberprzestępców? Energetyka24.com*, 2021.
18. Papathanasiou D., *Why energy storage matters for the global energy transition*, World Bank Blogs, 2023.
19. REN21. *Renewables 2023 Global Status Report*. Paryż: REN21 Secretariat, 2023.
20. Sanchez J.H., Castro L.M., *Advanced three-stage photovoltaic system phasor model for grid integration dynamic studies*, Solar Energy 235, 2022.
21. Shaw V., Bellini E., *Longi achieves 34.6% efficiency for two-terminal tandem perovskite solar cell prototype*, PV Magazine International, 2024.

22. Togun H., Basem A., Jweeg M.J., Biswas N., Abed A.M., Paul D., Mohammed H.I., Chattopadhyay A., Sharma B.K., Abdulrazzaq T., *Advancing organic photovoltaic cells for a sustainable future: The role of artificial intelligence (AI) and deep learning (DL) in enhancing performance and innovation*, Solar Energy 291, 2025.
23. Tsuchida S., Nonaka H., Yamada N., *Deep Reinforcement Learning for the Optimal Angle Control of Tracking Bifacial Photovoltaic Systems*, Energies 15, 2022.
24. U.S. Department of Energy (DOE). *Sustainable and Holistic Integration of Energy Storage and Solar PV (SHINES)*. 2016.