dr inż. Tomasz Grudniewski
Akademia Bialska im. Jana Pawła II
ORCID: 0000-0003-3394-8992
https://doi.org/10.29316/9788368103199_12

INTEGRACJA FOTOWOLTAIKI WSPIERANEJ SZTUCZNĄ INTELIGENCJĄ W STRATEGIACH BEZPIECZEŃSTWA ENERGETYCZNEGO PAŃSTW

AI-SUPORTED PHOTOVOLTAICS IN NATIONAL ENERGY SECURITY STRATEGIES

Streszczenie

Celem rozdziału jest zbadanie, w jaki sposób różne państwa uwzględniają fotowoltaikę wspomaganą sztuczną inteligencją (AI) w swoich strategiach bezpieczeństwa energetycznego. Centralny problem badawczy dotyczy efektywnego włączenia technologii AI do rozwoju i zarządzania systemami fotowoltaicznymi, tak aby zwiększyć niezawodność dostaw, obniżyć koszty i jednocześnie ograniczyć ryzyka, w tym zagrożenia cybernetyczne. W tym kontekście przeanalizowano dokumenty strategiczne i regulacyjne (m.in. USA, UE, Chiny), konfrontując je z literaturą przedmiotu oraz raportami międzynarodowych organizacji (IEA, REN21). Metodologicznie zastosowano wieloaspektowe podejście: analizę jakościową dokumentów, studium przypadku wybranych państw oraz porównawczą syntezę wniosków. Dzięki

Summary

The chapter aims to investigate how various countries incorporate photovoltaics supported by artificial intelligence (AI) into their energy security strategies. The central research question focuses on the effective integration of AI technology into photovoltaic development and management to enhance supply reliability, reduce costs, and simultaneously address associated risks, including cyber threats. In this context, the study examines strategic and regulatory documents (e.g., from the U.S., EU, China) in light of existing literature and reports from international organizations (IEA, REN21). Methodologically, a multi-faceted approach was employed: qualitative document analysis, case studies of selected nations, and a comparative synthesis of findings. This approach provided a comprehensive view of current practices and challenges related

temu uzyskano pełniejszy obraz aktualnych praktyk i wyzwań związanych z integracją fotowoltaiki i AI. Wyniki analiz wskazują, że choć poszczególne kraje rozpoznają rosnące znaczenie tej technologii, to poziom formalnego uwzględnienia AI w politykach bezpieczeństwa energetycznego jest zróżnicowany. Na tej podstawie przedstawiono rekomendacje strategiczne, dotyczące m.in. ram regulacyjnych, inwestycji w infrastrukturę cyfrową i kształcenia kadr, a także postulat szerszej współpracy międzynarodowej w zakresie cyberbezpieczeństwa i standardów dla inteligentnych sieci.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, sztuczna inteligencja, bezpieczeństwo energetyczne, inteligentne sieci, polityka energetyczna

to the integration of photovoltaics and AI. The results indicate that, although individual countries recognize the growing importance of such technologies, the formal inclusion of AI in energy security policies varies widely. Based on these observations, strategic recommendations are offered, addressing regulatory frameworks, investments in digital infrastructure and workforce development, as well as the need for broader international cooperation on cybersecurity and intelligent-grid standards.

Keywords: photovoltaics, artificial Intelligence, energy security, smart grids, energy policy

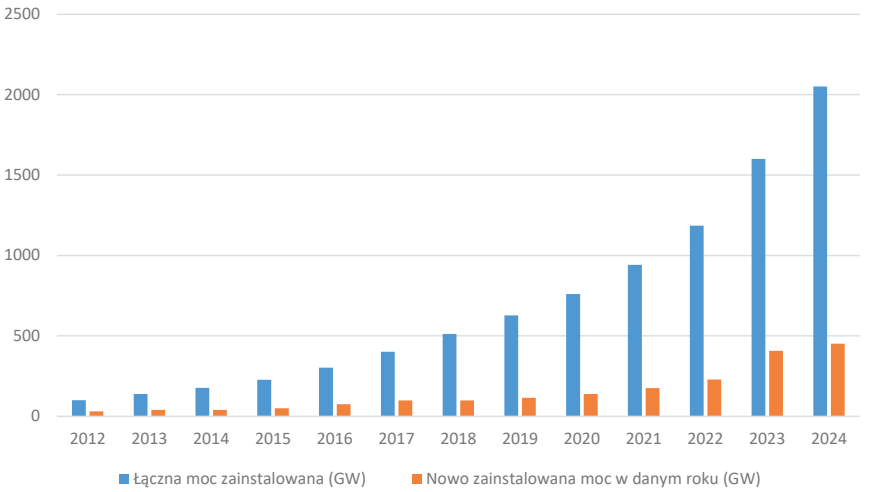
Wstęp

Transformacja energetyczna i rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) stały się kluczowym wymiarem polityki gospodarczej i bezpieczeństwa narodowego w XXI wieku. Bezpieczeństwo energetyczne tradycyjnie oznacza zdolność państwa do zapewnienia nieprzerwanego dostępu do energii po akceptowalnej cenie oraz ochrony przed zakłóceniami dostaw. Przez dekady koncentrowało się ono na zabezpieczeniu dostaw paliw kopalnych (ropy, gazu, węgla) i stabilności sieci elektroenergetycznej. Współcześnie nabiera jednak nowego znaczenia w obliczu dążenia do gospodarki niskoemisyjnej i rozproszonej produkcji energii. Fotowoltaika (PV) – najszybciej rosnące źródło energii elektrycznej ostatnich lat – odgrywa główną rolę w tym procesie. Globalna moc zainstalowana instalacji fotowoltaicznych przekroczyła już 1,6 terawata (TW) na koniec 2023 roku (wzrost z ok. 1,2 TW rok wcześniej), co oznacza, że energia słoneczna odpowiada za ponad 6% światowej produkcji elektryczności[1,2]. Dla porównania, w 2012 r. moc PV wynosiła zaledwie 0,1 TW. Taki skok ilustruje rysunek 1. Państwa dostrzegają szansę na dywersyfikację źródeł i częściowe uniezależnienie się od importowanych surowców, dzięki energii

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

[2] REN21 – *Renewables 2023 Global Status Report* – REN21 (Paris: REN21 Secretariat). 2023.

słonecznej. Co więcej, energia z dużych farm fotowoltaicznych stała się jedną z najtańszych form pozyskiwania elektryczności, przyciągając rekordowe inwestycje rzędu 0,5 bln USD w 2022 roku w skali świata[3].



Rysunek 1. Globalna zainstalowana i prognozowana (2024) moc fotowoltaiczna i roczne przyrosty w latach 2012–2024 (opracowanie własne na podstawie danych IEA-PVPS[3] i REN21[4])

Źródło: opracowanie własne.

Jednocześnie dynamiczny rozwój źródeł odnawialnych wiąże się z nowymi wyzwaniami technologicznymi i strategicznymi. W systemie energetycznym opartym w większym stopniu na energii słonecznej i wiatrowej rośnie znaczenie rozwiązań zapewniających elastyczność sieci, zdolność bilansowania podaży i popytu w czasie rzeczywistym oraz odporność na zakłócenia. W integracji rozproszonych, zależnych od pogody źródeł OZE coraz większą rolę odgrywa cyfryzacja i sztuczna inteligencja (SI, AI). Dzięki analizie ogromnych zbiorów danych i uczeniu maszynowemu, algorytmy AI mogą optymalizować zużycie energii, poprawiać stabilność sieci i wspomagać podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym[5]. Sztuczna inteligencja jest postrzegana jako technologia o przełomowym potencjale dla sektora energii – może przyspieszyć innowacje,

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

[4] REN21 – *Renewables 2023 Global Status Report – REN21* (Paris: REN21 Secretariat). 2023.

[5] WEF – Al-Zu'bi, I., "*Energy and AI: the power couple that could usher in a net-zero world*", World Economic Forum, 2025.

zwiększyć efektywność systemów elektroenergetycznych oraz wzmocnić bezpieczeństwo energetyczne dostaw[6]. Co więcej, stała się technologią transformacyjną usprawniającą każdy element systemu energetycznego – od integracji OZE po stabilizację sieci[7]. Według analiz Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA) zastosowanie AI i zaawansowanej analityki danych w energetyce może przynieść do 2030 roku nawet 1,3 bln USD wartości ekonomicznej dzięki poprawie efektywności i nowym modelom biznesowym, a globalna emisja CO_2 mogłaby spaść o 5-10% (co odpowiada rocznej emisji całej Unii Europejskiej)[8]. AI umożliwia m.in. precyzyjne prognozowanie generacji fotowoltaiki i popytu, automatyczne sterowanie popytem (np. urządzeniami domowymi czy ładowaniem pojazdów elektrycznych), a także predykcyjną konserwację infrastruktury – identyfikując awarie paneli czy falowników zanim spowodują one przerwy w dostawach. Zgodnie z najnowszymi badaniami, AI oferuje również „rewolucyjne rozwiązania" usprawniające integrację OZE, zarządzanie magazynami energii i bezpieczeństwo sieci[9].

Wszystko to sprawia, że fotowoltaika wspierana sztuczną inteligencją jawi się jako strategiczne połączenie mogące zarówno wspomóc osiągnięcie celów klimatycznych, jak i zwiększyć niezawodność oraz bezpieczeństwo dostaw energii w państwach na całym świecie. Nic więc dziwnego, że coraz więcej rządów i organizacji międzynarodowych pochyla się nad kwestią integracji cyfrowych innowacji w sektorze energetycznym. Komisja Europejska w 2022 r. przyjęła Plan działań UE na rzecz cyfryzacji systemu energetycznego, wskazując, że nowe technologie (w tym IoT i AI) są kluczowe, by efektywnie wykorzystywać zasoby energii i zwiększyć udział OZE w mixie energetycznym – co stało się pilne w obliczu kryzysu cenowego i konieczności uniezależnienia się od importu paliw kopalnych[10]. Podobnie w skali globalnej IEA zainicjowała w 2024 r. program „Energy for AI, AI for Energy", podkreślając potrzebę współpracy rządów, sektora energii i technologii w celu bezpiecznej

[6] IEA – Birol, F., Press Release: "*IEA's first major Global Conference on Energy & AI*", International Energy Agency, 2024.

[7] Y. Wang, X. Zhao, J. Martin, S. Liu, *The role of AI in accelerating the adoption of intermittent renewable energies*. Energy Strategy Reviews, 40, 103045. 2025.

[8] WEF (2025) – Al-Zu'bi, I., "*Energy and AI: the power couple that could usher in a net-zero world*", World Economic Forum, 2025.

[9] H. Chen, J. Park, Q. Li, *Revolutionizing solar PV integration: AI-driven forecasting and grid stability*. Energy, 263, 125879. 2025.

[10] European Commission – "*Digitalising the energy system – EU Action Plan*", Komunikat COM(2022) 552 final, Brussels, 2022.

i efektywnej cyfryzacji energetyki. Jak ujął to dyrektor wykonawczy IEA Fatih Birol: „Nie ma AI bez energii – szczególnie elektryczności. […] Jednocześnie AI może być technologią transformacyjną dla sektora energii, z potencjałem poprawy efektywności i bezpieczeństwa, przyspieszenia transformacji”[11]. Na tym tle wyłania się pytanie o to, czy i jak rządy państw uwzględniają fotowoltaikę wspieraną AI w swoich strategiach bezpieczeństwa energetycznego. Niniejszy rozdział podejmuje tę problematykę, analizując globalne podejścia strategiczne do integracji PV+AI, identyfikując najlepsze praktyki oraz luki polityczne, a także formułując rekomendacje.

Celem niniejszego rozdziału jest przeanalizowanie, w jaki sposób państwa na świecie uwzględniają fotowoltaikę wspomaganą sztuczną inteligencją w swoich strategiach bezpieczeństwa energetycznego. Analiza ma na celu zidentyfikowanie najlepszych praktyk politycznych i strategicznych w integrowaniu nowych technologii (PV + AI) w politykach energetycznych, a jednocześnie wskazanie luk i braków w obecnych strategiach. Na tej podstawie sformułowane zostaną rekomendacje dla decydentów – zarówno na poziomie krajowym, jak i międzynarodowym – odnośnie do działań niezbędnych dla efektywnego wykorzystania synergii fotowoltaiki i AI w umacnianiu bezpieczeństwa dostaw energii. Główny problem badawczy można sformułować następująco: W jaki sposób fotowoltaika wspierana sztuczną inteligencją może zostać efektywnie zintegrowana z narodowymi strategiami bezpieczeństwa energetycznego oraz jakie korzyści i wyzwania strategiczne wiążą się z taką integracją? Innymi słowy: czy rządy adekwatnie reagują na rozwój PV i AI w kontekście bezpieczeństwa dostaw energii, czy też istnieje potrzeba aktualizacji i wzmocnienia strategii energetycznych o te nowe elementy? Rozwiązanie tego problemu wymaga ustalenia, czy i gdzie polityki energetyczne uwzględniają (bądź pomijają) zastosowania AI na różnych etapach łańcucha wartości fotowoltaiki – od prognozowania produkcji, przez sterowanie siecią i magazynowanie, po obsługę odbiorców. Badanie dotyczy również bilansu korzyści (np. lepsze prognozy i stabilność dostaw, zwiększenie udziału energii słonecznej, obniżenie kosztów) oraz ryzyka (np. cyberbezpieczeństwo, zależność od dostawców technologii, koszty wdrożeń) związanych z integracją PV+AI w skali państwa. W celu realizacji powyższego problemu i odpowiedzi na postawiony cel badawczy zastosowano wieloaspektowe podejście

[11] IEA – Birol, F., Press Release: “*IEA’s first major Global Conference on Energy & AI*”, International Energy Agency, 2024.

badawcze. Po pierwsze, przeprowadzono analizę literatury przedmiotu, obejmującą najnowsze publikacje naukowe oraz raporty uznanych organizacji (m.in. IEA, IRENA, REN21) dotyczące cyfryzacji energetyki, zastosowań AI w OZE oraz polityk energetycznych. Szczególną uwagę poświęcono raportom strategicznym i prognostycznym, takim jak raport RAND Corporation z 2024 r. dotyczącym wykorzystania AI dla poprawy bezpieczeństwa energetycznego, a także opracowaniom Międzynarodowej Agencji Energetycznej (np. komentarze analityczne IEA na temat AI w energetyce)[12]. Po drugie, dokonano analizy dokumentów strategicznych i regulacyjnych wybranych państw i regionów: przeanalizowano krajowe polityki energetyczne (m.in. strategie bezpieczeństwa energetycznego USA, Chin, Wielkiej Brytanii), strategie rozwoju AI oraz dokumenty UE (np. Plan działań UE na rzecz cyfryzacji systemu energii 2022, projekt Rozporządzenia UE w sprawie AI)[13]. Wykorzystano również dane statystyczne (dot. mocy zainstalowanej PV, udziału OZE, itp.) z raportów REN21 i IEA-PVPS, co pozwoliło osadzić rozważania w kontekście aktualnej struktury rynku PV. Po trzecie, zastosowano studium przypadku w ujęciu porównawczym: prześledzono i zestawiono podejścia do integracji PV+AI m.in. w Stanach Zjednoczonych, Unii Europejskiej (oraz wybranych państwach członkowskich, jak Niemcy czy Polska), Chinach, a także w zarysie w innych krajach wyróżniających się w tych obszarach (np. Japonii, Australii). Takie podejście umożliwia dostrzeżenie różnic i podobieństw – np. między państwami wiodącymi technologicznie a rozwijającymi się. Analiza objęła także inicjatywy międzynarodowe dotyczące AI w energetyce, w tym działania IEA, OECD oraz partnerstw publiczno-prywatnych (np. WEF Energy Transition Index i inicjatywy typu Mission Innovation). Wyniki tych analiz zostały poddane syntezie w celu sformułowania wniosków i rekomendacji.

Fotowoltaika, sztuczna inteligencja i bezpieczeństwo energetyczne – związek i znaczenie

Integrowanie fotowoltaiki z rozwiązaniami sztucznej inteligencji niesie ze sobą potencjał podniesienia bezpieczeństwa energetycznego państw na kilka

[12] RAND (2024) – Nouwens, Meiser et al., "*The use of AI for improving energy security: Exploring risks and opportunities in the electricity system*", RAND Corporation Research Report RRA2907-1, 2024.

[13] European Commission – *Digitalising the energy system – EU Action Plan*, Komunikat COM(2022) 552 final, Brussels, 2022.

sposobów. Przede wszystkim PV+AI może zwiększyć niezawodność i odporność systemu energetycznego. Tradycyjnie stabilność sieci elektrycznej opierała się na sterowaniu produkcją w dużych, centralnych elektrowniach, podczas gdy OZE (jak fotowoltaika) wprowadzają do systemu zmienność i nieprzewidywalność produkcji zależnej od warunków pogodowych. Dzięki AI ta nieprzewidywalność może być skuteczniej opanowana: algorytmy uczące się na podstawie danych meteorologicznych i historycznych są w stanie z dużą dokładnością prognozować nasłonecznienie i generację PV nawet z kilkudziesięciogodzinnym wyprzedzeniem. Przykładowo, firma Google wraz z DeepMind opracowała sieć neuronową do przewidywania produkcji swoich farm wiatrowych z 36-godzinnym wyprzedzeniem – zwiększając wartość energii sprzedawanej na rynku o 20% dzięki lepszemu planowaniu dostaw. Podobne podejścia stosuje się do farm fotowoltaicznych – precyzyjny forecasting pozwala operatorom sieci wcześniej reagować (np. uruchamiać rezerwy) i zapobiegać niedoborom mocy. Z kolei na poziomie odbiorców końcowych, inteligentne liczniki i systemy zarządzania popytem potrafią automatycznie dostosować zużycie – np. włączać bojlery czy ładowanie baterii właśnie wtedy, gdy świeci słońce i energia PV jest najobficiej dostępna. Takie zarządzanie popytem z wykorzystaniem AI („demand response") zmniejsza szczytowe obciążenia i ryzyko przeciążeń, wzmacniając pewność dostaw. Integracja AI podnosi też niezawodność odnawialnych źródeł energii oraz efektywność ich wykorzystania, wspierając bezpieczeństwo energetyczne i cele zrównoważonego rozwoju[14].

AI przyczynia się również do dywersyfikacji źródeł i lepszego wykorzystania istniejących zasobów energii słonecznej. Dzięki technikom uczenia maszynowego możliwe jest bardziej efektywne sterowanie dużymi zbiorowościami rozproszonych instalacji PV – tworzenie tzw. wirtualnych elektrowni (VPP). Wirtualna elektrownia to platforma, która inteligentnie zarządza i agreguje generację, magazynowanie oraz zużycie energii w rozproszonej sieci prosumentów, reagując na sygnały rynkowe i potrzeby systemu. AI stanowi mózg takiego systemu, decydując, kiedy gromadzić energię (np. ładować domowe baterie lub akumulatory samochodów elektrycznych), a kiedy oddawać ją do sieci, aby zmaksymalizować zarówno korzyści dla właścicieli instalacji, jak i stabilność sieci[15]. Dobrze zaprojektowane VPP mogą pełnić funkcje podobne

[14] S. Raman, S. Kumari, A. Ortiz, *Synergizing AI and renewables to achieve SDG7: A global assessment of energy security and sustainability*. Sustainability, 16(8), 4501, 2024.

[15] WEF (2025) – Al-Zu'bi, I., "*Energy and AI: the power couple that could usher in a net-zero world*", World Economic Forum, 2025.

do tradycyjnych elektrowni – dostarczając moc w szczycie zapotrzebowania lub wspomagając regulację częstotliwości – ale złożone są z tysięcy małych, rozproszonych źródeł PV, magazynów i odbiorników. Australijskie i europejskie projekty VPP pokazują, że z pomocą AI możliwe jest uzyskanie wysokiej efektywności takich rozwiązań i zapewnienie, że duży udział PV w miksie nie zagrozi bezpieczeństwu dostaw energii (np. inicjatywy opisywane przez delfos.energy). Dzięki AI możliwa jest również dynamiczna integracja niestabilnych źródeł, redukcja obciążenia sieci w szczytach oraz unikanie przerw w zasilaniu[16].

Kolejnym aspektem jest obniżanie kosztów operacyjnych i poprawa efektywności dzięki AI. Utrzymanie farm fotowoltaicznych i sieci wymaganej do integracji dużej mocy PV generuje nowe wyzwania – np. konieczność monitoringu dziesiątek tysięcy paneli czy setek inwerterów w czasie rzeczywistym. Zastosowanie kamer termowizyjnych i dronów wyposażonych w algorytmy rozpoznawania obrazów (AI) pozwala automatycznie wykrywać uszkodzone lub zabrudzone moduły, zanim spowodują spadek wydajności. Predykcyjne utrzymanie ruchu (predictive maintenance) oparte na AI identyfikuje wzorce wskazujące przyszłe awarie transformatorów, połączeń czy baterii, co umożliwia zaplanowanie napraw i uniknięcie awaryjnych przestojów. W konsekwencji, farmy PV działają z wyższą dyspozycyjnością, a sieć elektroenergetyczna jest mniej narażona na nagłe zakłócenia – co bezpośrednio przekłada się na bezpieczeństwo dostaw. AI umożliwia przełomową poprawę efektywności i stabilności pracy instalacji PV, przewyższając tradycyjne metody[17]. Nie można zapominać, że AI wspiera także długoterminowe planowanie i politykę energetyczną. Dzięki zaawansowanym modelom optymalizacyjnym, decydenci mogą symulować różne scenariusze rozwoju fotowoltaiki (np. rozmieszczenia geograficzne instalacji, poziom autokonsumpcji prosumentów) i oceniać ich wpływ na bezpieczeństwo systemu. AI potrafi przetwarzać ogromne zbiory danych – od meteorologii, przez profile zużycia, po ceny rynkowe – wskazując najbardziej efektywne inwestycje zwiększające bezpieczeństwo energetyczne (np. lokalizacje magazynów energii buforujących wahania PV). Wreszcie, sztuczna inteligencja może pomóc w wykrywaniu zagrożeń dla

[16] R. Balamurugan, M. Huang, D. Kim, H. Amano, *Smart Grids and Artificial Intelligence: Enabling large-scale solar and wind penetration*. Frontiers in Energy Research, 13, 1155337. 2025.

[17] X. Tian, A. Foong, T. Nguyen, *Artificial Intelligence Applications in Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review*. CAAI Artificial Intelligence Research, 11(2), 2024, s. 146-160.

bezpieczeństwa – np. anomalie w sygnałach sterujących mogą wskazywać na cyberatak na farmę fotowoltaiczną lub system zdalnego sterowania (SCADA) sieci[18]. W dobie rosnącego ryzyka cyberzagrożeń dla infrastruktury krytycznej, zdolność AI do natychmiastowego rozpoznania nietypowych wzorców i aktywacji procedur obronnych jest nieoceniona.

Podsumowując, fotowoltaika wspierana AI może wzmacniać filary bezpieczeństwa energetycznego: dostępność (bo większy potencjał OZE dostępny lokalnie), przystępność cenową (optymalizacja kosztów i efektywności), oraz odporność (inteligentne reagowanie na zakłócenia i ataki). AI przyczynia się do tworzenia odpornych, niskoemisyjnych systemów energetycznych o wysokiej efektywności kosztowej, co jest kluczowe dla bezpieczeństwa dostaw[19]. Jednak skala tych korzyści zależy od odpowiedniego wdrożenia technologii oraz ram politycznych sprzyjających cyfryzacji energetyki. W kolejnych częściach przyjrzymy się, jak poszczególne państwa i regiony podchodzą do integracji PV+AI w swoich strategiach.

Strategie wybranych państw w zakresie PV i AI – najlepsze praktyki i luki

Stany Zjednoczone są jednym z globalnych liderów zarówno pod względem zainstalowanej mocy fotowoltaicznej, jak i rozwoju sztucznej inteligencji. Pod koniec 2022 roku USA posiadały ok. 142 GW mocy PV (drugie miejsce na świecie po Chinach), co stanowiło nieco ponad 12% udziału w globalnej mocy PV[20]. Mimo imponującego rozwoju energetyki słonecznej, analiza dokumentów strategicznych USA pokazuje, że integracja AI w polityce energetycznej dopiero raczkuje. Kluczowe dokumenty dotyczące bezpieczeństwa energetycznego – takie jak federalna ustawa Energy Security and Independence Act z 2022 r. czy Strategia Energetyczna Departamentu Obrony USA z 2023 r. – nie wspominają explicite o sztucznej inteligencji. Oznacza to, że kwestie cyfryzacji i inteligentnego zarządzania siecią nie zostały wprost uwzględnione w narracji o bezpieczeństwie dostaw.

[18] RAND (2024) – Nouwens, Meiser et al., "*The use of AI for improving energy security: Exploring risks and opportunities in the electricity system",* RAND Corporation Research Report RRA2907-1, 2024.

[19] G. Kyriakarakos (ed.), *AI, clean energy, and the resilience of future power systems*. Sustainability, 17(3), 1987. 2025.

[20] REN21 – *Renewables 2023 Global Status Report – REN21* (Paris: REN21 Secretariat). 2023.

Nie znaczy to jednak, że w USA brakuje inicjatyw łączących AI i energetykę. Wręcz przeciwnie – działania te toczą się na poziomie agencji rządowych i programów badawczych. Departament Energii (DoE) USA prowadzi aktywne prace nad zastosowaniami AI w sektorze energii, m.in. poprzez specjalne jednostki organizacyjne. W 2019 r. utworzono w DoE Biuro ds. Sztucznej Inteligencji i Technologii (AITO), którego celem jest koordynacja badań i wdrożeń AI w projektach energetycznych. DoE opracował też ramy zarządzania ryzykiem AI (AI Risk Management Playbook) dla zastosowań w energetyce. Co istotne, Kongres USA uchwalił National AI Initiative Act (2020) ustanawiając programy wsparcia badań AI w różnych sektorach, w tym w energetyce – wskazując DoE jako jeden z filarów tych działań. Mimo że przepisy energetyczne nie wymieniają AI, to administracja podejmuje kroki, by włączyć AI do praktyki zarządzania siecią. Symbolicznym zwrotem ku integracji technologii był Rozkaz Wykonawczy Prezydenta USA z października 2023 r. dotyczący AI, który zobowiązał Sekretarza Energii USA do przygotowania publicznego raportu o tym, jak AI może usprawnić planowanie, inwestycje i operacje sieci elektroenergetycznej. To pierwszy tak bezpośredni sygnał na szczeblu najwyższym, że AI jest postrzegana jako element przyszłego systemu energetycznego kraju. W praktyce, w USA trwają liczne projekty pilotażowe z zakresu inteligentnych sieci (smart grids) i magazynowania energii sterowanego AI. Kilka stanów (m.in. Kalifornia, Hawaje, Nowy Jork) promuje inicjatywy wirtualnych elektrowni zarządzanych przez algorytmy – np. łączenie domowych magazynów Tesla Powerwall w sieci reagujące na zapotrzebowanie. Operatorzy systemów energetycznych (ISO/RTO) coraz częściej korzystają z narzędzi analitycznych AI do prognoz obciążenia i wykrywania anomalii w pracy sieci. Najlepszą praktyką w USA jest z pewnością intensywny rozwój partnerstw publiczno-prywatnych – np. współpraca DoE z firmami z Doliny Krzemowej nad aplikacjami AI do optymalizacji pracy inwerterów PV czy dynamicznego sterowania falownikami w warunkach przeciążeń. Amerykańska strategia charakteryzuje się więc oddolnym, technologicznym podejściem – „de facto" integracją PV+AI, choć brakuje jeszcze spójnej narracji politycznej łączącej te obszary. Luką pozostaje brak zaktualizowanej strategii bezpieczeństwa energetycznego, która uwzględniałaby rozwój OZE i cyfryzację jako elementy zwiększające odporność systemu. Wydaje się, że jest to kierunek, w którym w najbliższych latach USA będą musiały pójść, zwłaszcza w obliczu realizacji ambitnych celów klimatycznych (100% czystej energii elektrycznej do 2035 r.) i związanej z tym konieczności istotnej przebudowy sieci.

Unia Europejska

Unia Europejska jako blok gospodarczy, dysponuje łącznie zbliżoną mocą fotowoltaiki co Stany Zjednoczone – na koniec 2022 r. kraje UE miały łącznie ponad 208 GW mocy PV (najwięcej: Niemcy ok. 67 GW, Hiszpania 26 GW, Włochy 25 GW, Francja 18 GW, Niderlandy 18 GW)[21]. UE wyróżnia się jednak systemowym podejściem do transformacji energetycznej i cyfryzacji. Integracja inteligentnych technologii w energetyce jest explicite częścią polityk UE, choć dokonuje się to kilkoma równoległymi ścieżkami. Przede wszystkim Unia finalizuje obecnie pierwsze w świecie kompleksowe prawo dotyczące AI – Akt o Sztucznej Inteligencji (AI Act). Projekt tego rozporządzenia (procedowany od 2021 r.) przyjmuje podejście oparte na ocenie ryzyka i wprost wymienia zastosowania AI w zarządzaniu sieciami elektroenergetycznymi jako obszary wysokiego ryzyka, podlegające ostrzejszym wymogom bezpieczeństwa i certyfikacji. Oznacza to, że UE już na etapie regulowania AI przewiduje jej kluczową rolę w infrastrukturze energetycznej – wiążąc ją z kwestią bezpieczeństwa (rozumianego także jako bezpieczeństwo użytkowników i stabilność dostaw).

Z drugiej strony, polityka energetyczna UE akcentuje cyfryzację jako środek do osiągnięcia celów bezpieczeństwa i zrównoważenia. W ramach Europejskiego Zielonego Ładu wskazano cyfryzację jako jeden z filarów transformacji (obok OZE i efektywności). W 2022 r. Komisja Europejska ogłosiła wspomniany Action Plan on Digitalising the Energy System, który zawiera szereg działań – od wspólnych przestrzeni danych energetycznych, przez wsparcie rozwoju sieci inteligentnych, po wzmocnienie cyberbezpieczeństwa sektora energii[22]. Plan ten powstał w reakcji na kryzys wywołany rosyjską agresją na Ukrainę – cyfryzacja ma pomóc "zakończyć zależność UE od rosyjskich paliw kopalnych i sprostać kryzysowi klimatycznemu", m.in. poprzez większe wykorzystanie lokalnych OZE. Jest to wyraźny przykład uznania, że fotowoltaika wraz z inteligentnym zarządzaniem (AI), to nie tylko kwestia innowacji, ale i geostrategicznej odporności. W planie podkreślono, że do integracji masowego napływu OZE niezbędne są nowinki cyfrowe – inteligentne budynki, liczniki, urządzenia IoT zbierające dane o zużyciu i generacji, a także nowe usługi i aplikacje dla prosumentów. Komisja powołała też

[21] REN21 – *Renewables 2023 Global Status Report* – REN21 (Paris: REN21 Secretariat). 2023.

[22] European Commission (2022) – *Digitalising the energy system – EU Action Plan*, Komunikat COM(2022) 552 final, Brussels, 2022.

specjalną Grupę Ekspercką ds. Inteligentnej Energii (Smart Energy Expert Group) z udziałem przedstawicieli państw członkowskich, by koordynować te wysiłki.

Na poziomie krajowym w Europie widać zróżnicowanie. Niemcy – posiadające największą moc PV w UE – w 2022 r. przyjęły pakiet reform ("Osterpaket") przyspieszający rozwój OZE, w którym znalazły się zapisy o modernizacji sieci i inteligentnych rozwiązaniach (m.in. zniesienie podatku VAT na małe PV i obowiązek instalowania inteligentnych liczników). Francja i Hiszpania kładą nacisk na rozwój magazynów energii i pojazdów elektrycznych w sieci, co ściśle łączy się z AI (np. sterowanie ładowaniem EV w godzinach nadmiaru energii słonecznej). Polityki innowacji w wielu krajach UE (np. Francja AI for Humanity, Strategia AI Polski 2019) wymieniają sektor energetyczny jako priorytetowy obszar wdrożeń AI, choć często brak konkretnych mechanizmów wcielenia tego w życie. Najlepszą praktyką UE jest zapewne jej podejście regulacyjne i holistyczna strategia. UE jako jedna z nielicznych wyraźnie wskazuje w dokumentach strategicznych, że AI w energetyce może służyć zarówno równoważności, jak i bezpieczeństwu. Wspomniany plan cyfryzacji postuluje tworzenie cyfrowych bliźniaków systemu elektroenergetycznego, większą wymianę danych między operatorami sieci a producentami OZE, a także włącza sektor energii w szersze inicjatywy cyfrowe (np. chmurę europejską). Uzupełnieniem jest unijny Fundusz Odbudowy (Next Generation EU), z którego miliardy euro kierowane są na inteligentne sieci i innowacje smart grid w państwach członkowskich. Dzięki temu kraje takie jak Hiszpania czy Grecja finansują modernizację sieci przesyłowych, instalację sensorów i automatyki – przygotowując grunt pod AI. Wciąż jednak istnieją luki. UE nie posiada jednej, dedykowanej strategii łączącej AI + PV + bezpieczeństwo energetyczne – elementy te są porozrzucane w różnych politykach (AI Act, Zielony Ład, Unia Energetyczna). W praktyce implementacja zależy od państw członkowskich. Część krajów (np. Polska) szybko zwiększyła moc PV, ale cyfryzacja sieci za tym nie nadąża – co skutkuje lokalnymi problemami (przeciążenia linii, wyłączanie farm w słoneczne dni). Wyzwaniem pozostaje ujednolicenie standardów – np. interoperacyjność inteligentnych urządzeń, bezpieczeństwo danych pomiarowych – nad czym UE dopiero pracuje (zob. energy.ec.europa.eu). Niemniej, UE wydaje się świadoma konieczności aktualizacji paradygmatów bezpieczeństwa energetycznego: cyfryzacja i AI są traktowane jako nowe narzędzia zapewnienia bezpieczeństwa dostaw w epoce odnawialnej.

Chiny to światowy potentat fotowoltaiki – zainstalowana moc PV w Państwie Środka przekroczyła 392 GW na koniec 2022 r., co stanowi około 1/3 łącznej mocy fotowoltaicznej świata[23]. Żaden inny kraj nie przyłącza tyle nowych mocy słonecznych co Chiny; w 2023 r. tempo to jeszcze przyspieszyło (prognozowane dodatki rzędu 100–120 GW rocznie). Z tak ogromną bazą OZE kwestie integracji z siecią i stabilności dostaw nabierają pierwszorzędnego znaczenia. Jak zatem Chiny radzą sobie z połączeniem PV i AI? Oficjalne dokumenty strategiczne Chin dotyczące energii dotychczas nie eksponowały roli AI w kontekście bezpieczeństwa energetycznego – koncentrując się raczej na rozbudowie mocy i infrastrukturze fizycznej. Chińska strategia energetyczna (np. plan pięcioletni na lata 2021–2025) zakłada masową ekspansję OZE oraz budowę tzw. Nowego Systemu Energetycznego, obejmującego rozproszoną generację i magazyny. W tych planach wspomina się o "inteligentnych sieciach" i "internet+energia", jednak bez szczegółów. Natomiast polityka rozwoju AI w Chinach – niezwykle ambitna (Chiny chcą być globalnym liderem AI do 2030 r.) – jest traktowana jako odrębny nurt. Rząd Chiński wydał szereg wytycznych dot. AI (np. plan rozwoju AI 2017, regulacje 2022 dot. algorytmów rekomendacyjnych, 2023 dot. generatywnej AI), lecz skupiają się one na przemyśle, usługach, bezpieczeństwie publicznym, a mało bezpośrednio na energetyce. Sfera regulacyjna to jedno, ale praktyka to drugie. Chiny de facto bardzo intensywnie wdrażają AI w sektorze elektroenergetycznym, co może wynikać z olbrzymiej skali ich sieci i konieczności zarządzania nią w czasie rzeczywistym. Przykładem jest rozwój inteligentnych centrów sterowania siecią przez Państwową Sieć Energetyczną (State Grid) – operator sieci przesyłowej ChRL chwali się zastosowaniem algorytmów optymalizacyjnych do bilansowania obciążenia między regionami, co jest kluczowe, gdy na zachodzie kraju świeci słońce (ogromne farmy PV w Sinciangu i Gobi), a centra zużycia na wschodzie zgłaszają zapotrzebowanie. Ponadto Chiny inwestują w magazyny energii (w 2022 ogłoszono plan dodania 30 GW magazynów do 2025 r.) oraz elektrownie szczytowo-pompowe, które sprzężone z AI mogą buforować wahania produkcji PV. Rząd uruchomił też programy pilotażowe tzw. "energetycznego internetu rzeczy" – w wybranych miastach i prowincjach testuje się integrację tysięcy mikroźródeł, magazynów, ładowarek EV, sterowanych przez platformy AI w modelu podobnym do wirtualnej elektrowni.

[23] Reuters (2023) – Bose, S., *China's solar capacity expected to hit 1,000 GW by 2026, Rystad Energy says*, Reuters, 2023.

Co do oficjalnych inicjatyw, warto odnotować, że w marcu 2023 powołano w Chinach nowy Komitet ds. Transformacji Energetycznej (pod przewodnictwem premiera), który w agendzie ma m.in. promowanie inteligentnego podejmowania decyzji w elektroenergetyce z wykorzystaniem AI. Sugeruje to, że najwyższe kierownictwo dostrzega potrzebę połączenia tych dziedzin. Najlepszą praktyką Chin jest zatem ogromna skala wdrożeń pilotowych – np. projekty typu smart city, (w których AI zarządza lokalną siecią energetyczną z PV na dachach, magazynami i konsumentami). Azerbejdżan, aspirujący do korzystania z chińskich doświadczeń, wskazuje, że w Chinach powstają już fabryki i całe osiedla zeroemisyjne, gdzie AI monitoruje dane w czasie rzeczywistym i optymalizuje zużycie energii – co pozwala redukować emisje i poprawiać efektywność. Analiza dla Chin sugeruje, że rozwój sztucznej inteligencji przekłada się na szybszy rozwój OZE i transformację energetyczną państwa[24]. Luki w strategii Chin to przede wszystkim rozdźwięk między regulacją AI a energetyką. Silne restrykcje dotyczące np. algorytmów (prawo z 2022 wymaga rejestracji algorytmów rekomendacji) mogą hamować innowacje także w energetyce, jeśli potraktuje się je literalnie. Ponadto chińska sieć wciąż opiera się na scentralizowanym modelu zarządzania – pytanie, na ile dopuszczą oni model zdecentralizowany (prosumentów z AI), który mógłby zwiększyć bezpieczeństwo poprzez redundancję. Wyzwanie stanowi też cyberbezpieczeństwo – Chiny inwestują w technologie informatyczne w energetyce (np. własne systemy SCADA, AI oparte na krajowych chipach), by uniezależnić się od Zachodu i zabezpieczyć przed cyberatakami. Można więc uznać, że integracja PV+AI jest w Chinach faktycznie realizowana, ale strategiczny dyskurs dopiero się rozwija. W nadchodzących latach zapewne pojawią się oficjalne wytyczne wiążące AI z bezpieczeństwem sieci – być może w kolejnej pięciolatce.

Inne wybrane przykłady

Poza wyżej omówionymi głównymi graczami warto spojrzeć na kilka innych państw, gdzie integracja fotowoltaiki i AI przykuwa uwagę[25]:

- **Indie** – posiadające ok. 79 GW PV (2022) – stawiają na rozwój OZE dla poprawy bezpieczeństwa energetycznego (uniezależnienie od importu

[24] P. Zhang, L. Wei, R. Sun, *Assessing the impact of artificial intelligence on China's energy transition: A quantitative approach*. Energy Economics, 129, 105835, 2024.

[25] REN21 – *Renewables 2023 Global Status Report* – REN21 (Paris: REN21 Secretariat). 2023.

paliw). Indyjskie inicjatywy Smart Grid Mission oraz liczne startupy AI (np. w Bangalore) skutkują projektami takimi jak inteligentne mikrosieci z PV dla wsi i miast. Politycznie Indie przyjmują jednak ostrożne podejście – w strategiach częściej mówią o „cyfryzacji sektora energii", niż konkretnie AI. Trwają pilotaże sieci samobilansujących się z PV i bateriami, co ma znaczenie np. dla armii (bazy off-grid).

- **Japonia** – około 84,5 GW PV (2022) – już od lat 90. rozwija koncepcje inteligentnych domów i budynków z OZE. Japońska strategia energetyczna kładzie nacisk na niezawodność (lekcje po Fukushimie), stąd duże zainteresowanie AI w systemach obrony przed blackoutami. Powstają systemy wykorzystujące uczenie maszynowe do wczesnego wykrywania niestabilności sieci na wyspach z dużym udziałem PV i automatycznego przełączania na tryb wyspowy z lokalnymi źródłami.
- **Australia** – ciekawy przypadek kraju o ogromnym potencjale PV (największy udział PV per capita na świecie, ponad 1/4 domów z panelami). Ze względu na rozległość sieci, Australia stała się poligonem dla rozwiązań VPP – np. program South Australia VPP łączy tysiące domowych instalacji wirtualnie. AI jest kluczem do koordynacji tych zasobów. Australijska polityka skupia się na market-driven solutions, wspierając regulatoryjnie możliwość agregacji i handlu energią przez prosumentów (peer-to-peer energy trading), co de facto promuje wykorzystanie AI (bo tylko algorytmy mogą obsłużyć, tak złożony rynek, w czasie rzeczywistym).
- **Bliski Wschód (np. ZEA)** – Zjednoczone Emiraty Arabskie i Arabia Saudyjska inwestują w giga-projekty solarne (jak park Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park) oraz aspirują do roli innowatorów AI (np. saudyjska inicjatywa NEOM). W ich strategiach bezpieczeństwa energetycznego AI pojawia się w kontekście efektywności – np. redukcji strat, optymalizacji odsalania wody zasilanego PV, czy zarządzania popytem w miastach klimatyzowanych. W 2023 r. Arabia Saudyjska ogłosiła program budowy smart grid z AI w ramach Vision 2030, co ma m.in. poprawić niezawodność dostaw przy rosnącym udziale PV w miksie (aktualnie nadal dominacja ropy/gazu).

Powyższe przykłady uzupełniają obraz: na całym świecie trwają eksperymenty i wdrożenia PV+AI, natomiast ich odzwierciedlenie w oficjalnych strategiach jest różne. Tabela 1 zbiera porównanie kilku kluczowych wskaźników (moc PV, ramy polityczne AI/energia) dla wybranych graczy.

Tabela 1. Moc zainstalowana fotowoltaiki i uwzględnienie AI w strategiach – wybrane państwa (2022/2023)

Państwo/ region	Moc zainst. PV (GW) – rok 2022[1]	Udział w globalnej mocy PV[1]	Strategie AI w energetyce (stany na 2024)
Chiny	392 GW	ok. 33%	Brak osobnej strategii AI-energia; regulacje AI ogólne (2022–23) nie dedykowane sektorowi energii. De facto masowe wdrożenia smart grid i VPP; 2023 – zalecenia rządowe dot. "inteligentnej elektroenergetyki".
USA	141,6 GW	ok. 12%	Brak wzmianki o AI w strategiach bezpieczeństwa energ. 2022; istnieje Narodowa Strategia AI 2020 (ogólnonaukowa) i programy DoE (AITO, projekty pilotażowe). 2023 – rozkaz Prezydenta integrujący AI z planowaniem sieci.
UE (27)	ok. 208 GW (w tym Niemcy 67)	ok. 17% (Niemcy 5,6%)	Strategie UE uwzględniają AI pośrednio: Akt o AI (wymogi dla AI w energii), Plan cyfryzacji energii 2022 (promuje IoT/AI), krajowe strategie AI w kilku krajach (DE, FR) wspominają energetykę. Brak jednolitej strategii PV+AI, trwają prace legislacyjne.
Indie	79 GW	ok. 6,7%	Brak formalnej strategii AI w energetyce; polityka OZE zakłada inteligentne sieci. Powstaje kilka projektów smart grid z AI (np. sterowanie mikrogridami na obszarach wiejskich). Rządowe instytuty testują AI do prognoz monsunów dla PV.
Japonia	84,5 GW	ok. 7,1%	Strategia energetyczna akcentuje niezawodność – AI wykorzystywana do stabilizacji sieci (nie formalizowane w polityce). Krajowa strategia AI (2019) – sektor energii jako jeden z priorytetów R&D. Programy pilotażowe inteligentnych miast i domów z PV (society 5.0).
Australia	26,9 GW (rozdrobnione prosum.)	ok. 2,3% (ale #1 per capita)	Brak scentralizowanej polityki (kompetencja stanów); praktyka: liczne wirtualne elektrownie i systemy zarządzania popytem z AI (największa penetracja na świecie). Federalnie: finansowanie badań smart grid, brak ograniczeń regulacyjnych dla AI.

Źródło: opracowanie własne.

Wyzwania integracji PV+AI

Mimo obiecujących korzyści, integracja fotowoltaiki i AI nie jest wolna od wyzwań. Identyfikacja tych barier ma kluczowe znaczenie, by strategie bezpieczeństwa energetycznego były kompletne i realistyczne. Poniżej omówiono najważniejsze z nich:

1) **Cyberbezpieczeństwo i odporność systemu.** Wraz z rosnącą cyfryzacją infrastruktury energetycznej pojawia się istotne ryzyko ataków cybernetycznych i nieautoryzowanych ingerencji. Paradoksalnie, coś co ma zwiększać bezpieczeństwo (AI zarządzająca siecią), może stać się nowym wektorem ataku. Inteligentne falowniki PV, liczniki smart czy koncentratory danych – jeśli zostaną zhakowane – mogą posłużyć do zakłócenia pracy systemu na dużą skalę. Raport RAND podkreśla, że podwyższone ryzyko cyber to jedno z głównych wyzwań wdrażania AI w system elektroenergetyczny[26]. Ponadto algorytmy AI bywają nieprzejrzyste (tzw. black box) – ich nieprzewidywalne działanie lub błędne decyzje również stanowią zagrożenie, zwłaszcza gdy AI autonomicznie steruje krytycznymi urządzeniami. Przykładowo, źle przeszkolony agent AI mógłby w niewłaściwym momencie odłączyć magazyn energii, potęgując awarię zamiast jej zapobiec. Aby zyskać zaufanie do AI, regulatorzy muszą wprowadzić normy i certyfikacje dla algorytmów w energetyce (co czyni UE w AI Act)[27] . Z punktu widzenia strategii państwa istotne jest też unikanie jednego dostawcy technologii (vendor lock-in) – poleganie np. tylko na zagranicznych platformach AI mogłoby tworzyć nową zależność (jak dawniej, od ropy). Podsumowując, wyzwaniem jest zapewnienie, że rozwój PV+AI idzie w parze z adekwatnymi zabezpieczeniami i ciągłym monitoringiem ryzyka.
2) **Ramy regulacyjne i standardy.** Nowe technologie często wyprzedzają prawo – tak jest i w tym przypadku. Wiele krajów nie posiada jeszcze regulacji obejmujących specyfikę AI w energetyce. Często AI wchodzi w lukę między sektorami: prawo energetyczne reguluje koncesje, moce i infrastrukturę, prawo cyfrowe – dane i algorytmy, ale brakuje spójności na styku. Przykładowo, kto ponosi odpowiedzialność, gdy algorytm zarządzający farmą PV popełni błąd skutkujący awarią sieci? Czy operator może podejmować decyzje na podstawie "czarnej skrzynki" AI bez wyjaśnień? Polityki i strategie muszą uaktualnić definicje bezpieczeństwa energetycznego, by obejmowały również aspekty cyfrowe. Dobrym kierunkiem jest tu praca UE – przegląd istniejących regulacji, czy

[26] RAND – Nouwens, Meiser et al., *The use of AI for improving energy security: Exploring risks and opportunities in the electricity system*, RAND Corporation Research Report RRA2907-1, 2024.

[27] European Commission (2022) – *Digitalising the energy system – EU Action Plan*, Komunikat COM(2022) 552 final, Brussels, 2022.

obejmują AI w energetyce i w razie potrzeby ich dostosowanie[27]. Bez ustanowienia standardów wymiany danych, interoperacyjności urządzeń IoT, czy minimalnych wymogów dla systemów wsparcia decyzji, integracja PV+AI może napotykać bariery biurokratyczne lub technologiczne. Brakujące ogniwo to także modele rynku – obecne rynki energii nie zawsze wynagradzają usługi, jakie może dać AI (np. redukcja popytu u prosumenta). Stąd część korzyści pozostaje niezdyskontowana ekonomicznie.

3) **Koszty wdrożenia i kompetencje.** Chociaż koszty samych instalacji PV spadły drastycznie, to dodanie do nich zaawansowanej automatyki, czujników, połączeń komunikacyjnych i infrastruktury IT wymaga inwestycji. Dla krajów rozwijających się może to być poważna przeszkoda – o ile panele mogą kupić tanio z Chin, o tyle wdrożenie skomplikowanych systemów AI może przekraczać ich możliwości finansowe lub organizacyjne. Potrzebne są kadry i know-how: analitycy danych, inżynierowie AI, operatorzy potrafiący korzystać z nowych narzędzi. Istnieje ryzyko, że nierówny dostęp do tych zasobów pogłębi cyfrową nierówność energetyczną między krajami bogatymi a biedniejszymi. W strategiach należałoby przewidzieć komponenty szkoleniowe i rozwojowe – tak, by bezpieczeństwo energetyczne wzmacniać budową rodzimego potencjału technologicznego. Niemniej ważna jest akceptacja społeczna: użytkownicy muszą ufać inteligentnym systemom (np. że ich dane zużycia są bezpieczne, a automatyczne sterowanie urządzeniami domowymi nie naruszy ich komfortu). Politycy powinni prowadzić dialog z obywatelami o korzyściach i zabezpieczeniach AI – w przeciwnym razie można napotkać opór, podobny do tego wobec liczników smart metering, w niektórych krajach.
4) **Obciążenie energetyczne AI.** Warto zauważyć, że AI sama w sobie zużywa energię – centra danych, serwery obsługujące uczenie maszynowe mają swój ślad energetyczny. Szacunki IEA wskazują, że globalne centra danych (w dużej mierze napędzane wzrostem AI) konsumują ok. 1% światowej elektryczności, a udział ten rośnie. Jeśli nie będzie on zasilany czystą energią, paradoksalnie AI może zwiększać popyt na prąd i obciążać system. Scenariusze przewidują, że do 2030 r. zużycie prądu przez

infrastrukturę AI może wzrosnąć o kilkadziesiąt procent[28]. To rodzi pytania o neutralność klimatyczną AI. W strategiach należałoby uwzględnić, że „nie ma AI bez energii" i planować zaopatrzenie cyfrowej gospodarki w czyste źródła (tu PV także może pomóc, zasilając np. farmy serwerów). W skali mikro, operatorzy powinni ocenić bilans – ile dodatkowego zużycia generuje u nich wdrożenie AI vs., ile oszczędza czy optymalizuje. Bez takiej oceny można wpaść w efekt odbicia: poprawa efektywności dzięki AI obniży koszty, co zachęci do większej konsumpcji energii gdzie indziej.

5) **Integracja międzysektorowa i złożoność systemu.** Bezpieczeństwo energetyczne to dziś szeroki koncept – obejmuje nie tylko prąd, ale i ciepło, paliwa, transport. AI może umożliwić tzw. sektor coupling – łączenie sektorów przez energię elektryczną (np. używanie nadwyżek PV do ładowania EV czy pomp ciepła)[28]. To wielka szansa, ale i wyzwanie: system staje się coraz bardziej skomplikowany, a ryzyko przenosi się między sektorami (np. awaria sieci prądu blokuje transport EV). Strategie muszą ogarniać tę całość. AI może wspomóc zarządzanie takim zintegrowanym systemem (np. dając priorytet krytycznym odbiorcom w sytuacji niedoborów), ale rodzi to pytania etyczne i społeczne – według jakich kryteriów algorytm ma decydować, komu odciąć dostawy w kryzysie? To dylematy, które dotychczas rozstrzygali ludzie (rządy, operatorzy) – czy powinniśmy je delegować AI? Bez społecznego konsensusu i odpowiednich regulacji może to być trudne do wdrożenia, mimo, że technicznie wykonalne.

Biorąc pod uwagę powyższe analizy, można sformułować szereg rekomendacji polityczno-strategicznych dla decydentów na szczeblu krajowym i międzynarodowym, aby efektywnie i bezpiecznie zintegrować fotowoltaikę wspieraną AI z strategiami bezpieczeństwa energetycznego[29]:

1) Włączenie AI do definicji i oceny bezpieczeństwa energetycznego. Rządy powinny formalnie uznać, że cyfrowe innowacje (AI, IoT, big data) stały się integralnym elementem infrastruktury energetycznej. Nowelizacje strategii bezpieczeństwa energetycznego powinny zawierać rozdziały poświęcone roli cyfryzacji w zapewnianiu bezpieczeństwa dostaw.

[28] WEF (2025) – Al-Zu'bi, I., *Energy and AI: the power couple that could usher in a net-zero world*, World Economic Forum, 2025.

[29] M. S. Danish, T. Senjyu, *Policy frameworks for AI-driven energy transition: Challenges and opportunities*. Sustainability, 15(14), 10612. 2023.

2) Tworzenie spójnych ram regulacyjnych dla AI w energetyce. Konieczne jest uzupełnienie istniejących przepisów tak, by pokryły lukę na styku AI-energetyka. W praktyce oznacza to np. wydanie przez regulatorów sektorowych wytycznych dla operatorów sieci odnośnie do stosowania algorytmów AI (wymogi testów bezpieczeństwa, audytu algorytmów, planów awaryjnych na wypadek błędów AI).
3) Inwestycje w infrastrukturę cyfrową i kompetencje. Decydenci powinni zapewnić odpowiednie finansowanie i zachęty dla modernizacji sieci energetycznych pod kątem zdolności do integracji PV+AI. Oznacza to wspieranie wdrożeń inteligentnych sieci (smart grid) – np. poprzez mechanizmy regulacyjne pozwalające operatorom odzyskiwać nakłady na ICT w taryfach.
4) Zapewnienie cyberbezpieczeństwa i odporności. Rządy muszą traktować kwestie cyber zagrożeń w energetyce priorytetowo. Zaleca się ustanowienie stałych mechanizmów współpracy między służbami cyberbezpieczeństwa a operatorami energii (np. wyspecjalizowane CERT dla sektora energii).
5) Tworzenie zachęt rynkowych do wykorzystania potencjału PV+AI. Rekomenduje się, by regulując rynki energii wprowadzać mechanizmy wynagradzające usługi elastyczności i stabilizacji świadczone przez rozproszone zasoby sterowane AI.

Podsumowanie

Fotowoltaika wspierana sztuczną inteligencją jawi się jako nieodzowny element przyszłych strategii bezpieczeństwa energetycznego[30]. Analiza globalnych trendów pokazała, że rosnący udział energii słonecznej w miksie wymusza nowatorskie podejścia do zarządzania systemem – i tu AI oferuje narzędzia pozwalające zachować stabilność i niezawodność dostaw. Państwa takie jak USA, Chiny czy członkowie UE już wdrażają rozwiązania PV+AI, choć stopień formalnego uwzględnienia ich w strategiach jest różny. Najlepsze praktyki obejmują m.in. inwestycje w inteligentne sieci (UE), tworzenie instytucjonalnych ram dla AI (USA – biuro AITO, rozkazy prezydenckie) czy masowe pilotaże technologii (Chiny). Z drugiej strony, luki strategiczne są widoczne tam, gdzie polityki bezpieczeństwa energetycznego nie nadążają za

[30] J. Xiao, F. Nadeem, M. Velli, Balancing energy security, decarbonization, and economic growth: The pivotal role of AI-based PV solutions, Applied Energy, t. 348, 121474, 2024.

technologiczną rzeczywistością – przykładowo brak wzmianek o AI w kluczowych dokumentach, brak standardów bezpieczeństwa czy niepełne wykorzystanie potencjału danych. W perspektywie globalnej, aby w pełni wykorzystać synergię fotowoltaiki i AI, konieczna jest aktualizacja paradygmatów polityki energetycznej. Bezpieczeństwo energetyczne w epoce transformacji, to nie tylko kwestia posiadania surowców czy mocy wytwórczych, ale też umiejętnego zarządzania informacją i technologią. Państwa, które szybko się do tego dostosują, zyskają przewagę – będą mogły bezpiecznie integrować duże wolumeny OZE, zapewniając jednocześnie stabilne i tanie dostawy energii swoim obywatelom. Z kolei opóźnienia lub zaniedbania (np. brak zabezpieczeń cybernetycznych) mogą prowadzić do nowych rodzajów kryzysów energetycznych. Podsumowując, fotowoltaika wspierana sztuczną inteligencją, to nie pieśń przyszłości, lecz już kształtująca się rzeczywistość.



Rysunek 2. Schemat koncepcji inteligentnej sieci integrującej źródła OZE (fotowoltaika, wiatr) z odbiorcami (domy, pojazdy elektryczne, przemysł) za pomocą strategii sterowania opartych na AI

Źródło: Zulu, M.L.T., Carpanen, R.P., Tiako, R., *A Comprehensive Review: AI Optimization in a Hybrid Microgrid under Faults*, Energies, 16(4), 1786, 2023.

Rysunek 2 obrazuje taką przyszłościową wizję – inteligentny system energetyczny, gdzie słońce, wiatr, magazyny, pojazdy i budynki połączone są siecią AI control strategies, niczym mózgiem operacji. Taka integracja przynosi

liczne korzyści: więcej czystej energii w systemie, większa elastyczność i efektywność, nowe usługi dla prosumentów, a ostatecznie – wzmocnione bezpieczeństwo energetyczne rozumiane jako zdolność do zaspokojenia potrzeb energetycznych w każdych warunkach. Warunkiem jest jednak, by decydenci dziś odpowiednio pokierowali strategiami, tworząc dogodne warunki dla bezpiecznego rozwoju tych technologii. Państwa, które zaniedbają ten obszar, mogą nie tylko stracić szansę na przyspieszenie zielonej transformacji, ale wręcz narazić się na nowe zagrożenia. Dlatego rekomendacje przedstawione powyżej powinny znaleźć odzwierciedlenie w politykach – tak, aby integracja fotowoltaiki wspieranej AI stała się filarem bezpiecznej, nowoczesnej i zrównoważonej energetyki na całym świecie.

Literatura

1. Balamurugan, R., Huang, M., Kim, D., Amano, H., *Smart Grids and Artificial Intelligence: Enabling large-scale solar and wind penetration*, Frontiers in Energy Research, t. 13, 1155337, 2025.
2. Chen, H., Park, J., Li, Q., Revolutionizing solar PV integration: AI-driven forecasting and grid stability, *Energy*, t. 263, 125879. 2025.
3. Danish, M.S., Senjyu, T., *Policy frameworks for AI-driven energy transition: Challenges and opportunities*, Sustainability, t. 15, nr 14, 10612, 2023.
4. European Commission, *Digitalising the energy system – EU Action Plan*, COM(2022) 552 final, Brussels, 2022.
5. IEA, Why *AI and energy are the new power couple*, IEA Commentary, 2023.
6. IEA, Press Release: *IEA's first major Global Conference on Energy & AI*, International Energy Agency, 2024.
7. IEA-PVPS, IEA Photovoltaic Power Systems Programme, *Snapshot of Global PV Markets 2023*, Report IEA-PVPS T1-42:2024, 2024.
8. Kyriakarakos, G., Editorial: *AI, clean energy, and the resilience of future power systems*, Sustainability, t. 17, nr 3, 1987, 2025.
9. Raman, S., Kumari, S., Ortiz, A., *Synergizing AI and renewables to achieve SDG7: A global assessment of energy security and sustainability*, Sustainability, t. 16, nr 8, 4501, 2024.
10. RAND, Nouwens, Meiser et al., *The use of AI for improving energy security: Exploring risks and opportunities in the electricity system*, RAND Corporation Research Report RRA2907-1, 2024.
11. REN21, *Renewables 2023 Global Status Report*, REN21 Secretariat, Paris, 2023.
12. Reuters, Bose, S., *China's solar capacity expected to hit 1,000 GW by 2026*, Rystad Energy says, 12 Sept. 2023.
13. Tian, X., Foong, A., Nguyen, T., *Artificial Intelligence Applications in Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review*, CAAI Artificial Intelligence Research, t. 11, nr 2, 2024, pp. 146-160.

14. Wang, Y., Zhao, X., Martin, J., Liu, S., *The role of AI in accelerating the adoption of intermittent renewable energies*, *Energy Strategy Reviews*, t. 40, 103045, 2025.
15. WEF, Al-Zu'bi, I., *Energy and AI: the power couple that could usher in a net-zero world*, World Economic Forum, 29 Jan 2025.
16. Xiao, J., Nadeem, F., Velli, M., *Balancing energy security, decarbonization, and economic growth: The pivotal role of AI-based PV solutions*, Applied Energy, t. 348, art. nr 121474, 2024.
17. Zhang, P., Wei, L., Sun, R., *Assessing the impact of artificial intelligence on China's energy transition: A quantitative approach*, Energy Economics, t. 129, 105835, 2024.
18. Zulu, M.L.T., Carpanen, R.P., Tiako, R., *A Comprehensive Review: AI Optimization in a Hybrid Microgrid under Faults*, Energies, 16(4), 1786, 2023.