



dr inż. Jacek Nowicki

EKSPERT DS. ZAGADNIENŃ ELEKTRYCZNYCH / ELEKTROENERGETYCZNYCH
PAŃSTWOWA AGENCJA ATOMISTYKI

Miks energetyczny. Magazynowanie energii i energetyka jądrowa – konkurencja czy synergia?

Streszczenie: W artykule przedstawiono syntetyczne informacje na temat miksu energetycznego w obszarze wytwarzania energii elektrycznej dla przykładowych 20 krajów europejskich i 12 krajów pozaeuropejskich. Omówiono nowe kierunki rozwoju miksu energetycznego przyszłości wobec wyzwań dekarbonizacji oraz powrotu do rozwoju energetyki jądrowej w kontekście jej współpracy ze źródłami odnawialnymi wspartymi magazynami energii.

Energy mix. Energy storage and nuclear energy – competition or synergy?

Summary: The article presents synthetic information on the energy mix in the area of electricity generation for 20 European and 12 non-European countries. New directions for the development of the energy mix of the future were discussed in the face of the challenges of decarbonization and the return to the development of nuclear energy in the context of its cooperation with renewable sources supported by energy storage.

Angielski pisarz Arthur C. Clarke (1917-2008) stwierdził kiedyś, że każda udana, rewolucyjna koncepcja przechodzi przez trzy fazy: pierwszą – „To zupełnie niemożliwe, nie tracimy czasu”, drugą – „Tak, to możliwe, ale niewarte zachodu” i trzecią – „Zawsze mówiłem, że to wspomniały pomysł”. Wdrażana od początku bieżącego stulecia, jakby powiedział to Clarke, „rewolucyjna koncepcja” wprowadzenia do systemu energetycznego dużych, niestabilnych mocy pochodzących z ogromnej liczby źródeł odnawialnych – elektrowni wiatrowych i instalacji fotowoltaicznych, zaczęła z czasem zupełnie poważnie zderzać się z problemem zapewnienia stabilności systemu elektroenergetycznego. Moc chwilowa pochodząca z turbin wiatrowych zależy wszak od bieżącej prędkości wiatru. Fotowoltaika pracuje tylko w ciągu dnia, a jej moc zależy od wysokości słońca na niebioskłonie, właściwego dla danej godziny i pory roku oraz bieżącego stanu zachmurzenia.

Oczywiście najlepszą metodą skompensowania niekontrolowanych zmian mocy źródeł odnawialnych jest zastosowanie magazynów energii, których technologie choć liczne, znajdują się na bardzo różnych poziomach rozwoju i dostępności. Można spotkać się z opiniami podważającymi pogląd o konieczności obecności w systemie dużych stabilnych mocy generowanych przez turbozespoły elektrowni ciepłych i wodnych stabilizujących i „ratujących” system w sytuacji, gdy wiatr nie wieje i słońce nie świeci. Być może zatem pojęcia

„podstawy systemu energetycznego” czy też „pracy w podstawie” trzeba będzie odłożyć do lamusa? Czy nowoczesną gospodarkę można zasilać tylko ze źródeł odnawialnych wspieranych magazynami energii?

Pytania o to, jak zapewnić energię elektryczną niezbędną dla funkcjonowania nowoczesnej cywilizacji i jednocześnie jak najbardziej ograniczyć negatywne skutki oddziaływania na środowisko, niezmiennie powraca w dyskusjach toczonych nie tylko przez specjalistów z dziedziny energetyki i elektroenergetyki, ale również polityków, dziennikarzy i wreszcie zwykłych obywateli. Jesteśmy obecnie świadkami rewolucyjnych zmian w dziedzinie polityki energetycznej na poziomie europejskim, zmierzających do radykalnej redukcji emisji dwutlenku węgla w krajach Unii Europejskiej. Plany rodzące się w Brukseli i Strasburgu wzbudzają ogromne emocje sięgające daleko poza mury uczelni technicznych, instytutów naukowo-badawczych, firm przemysłu elektrotechnicznego, budownictwa elektroenergetycznego i operatorów infrastruktury energetycznej. Warto, by rzeczona dyskusję wzbogacić o konkretne dane liczbowe i fakty, co z pewnością ułatwi każdemu wyrobienie sobie własnego zdania na ten jakże aktualny temat.

Jedną z osi sporu w debacie o właściwą kompozycję miksu energetycznego był do niedawna temat energetyki jądrowej. Pomimo tego, że jest to jedna z najlepszych, bezemisyjnych technologii energetycznych, opanowana technicznie

od około półwiecza, stawiana była ona w jednym rzędzie z energetyką węglową – przeznaczoną do rychłej likwidacji. Ostatnie dwa lata zmieniły postrzeganie atomu w miksie energetycznym. Obecnie uważany jest on za jedną z „zielonych” technologii przyczyniających się do dekarbonizacji, a tym samym ochrony przyrody i klimatu na naszej planecie.

MIKS ENERGETYCZNY

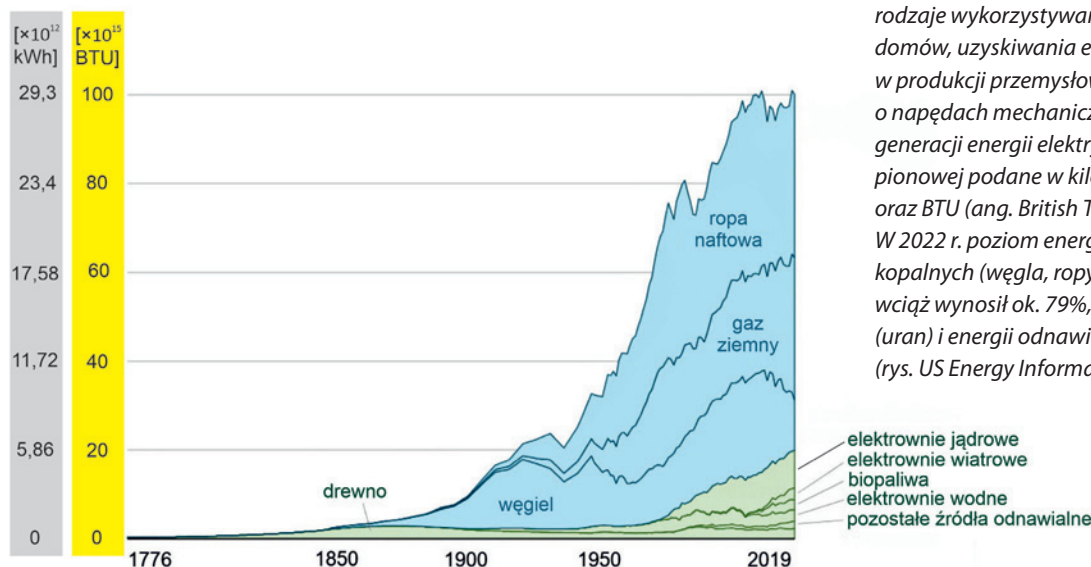
Trwającą do dziś rewolucję przemysłową zapoczątkowały w XVIII stuleciu epokowe odkrycia Thomasa Newcomena (1664-1729) i Jamesa Watta (1736-1819) w dziedzinie budowy i wykorzystania maszyn parowych. Industrializacja krajów Europy i Ameryki Północnej w XIX wieku spowodowała lawinowy wzrost zapotrzebowania na paliwa. Używane od wielu stuleci do ogrzewania i gotowania drewno i inne nośniki energii pierwotnej pochodzące z biosfery szybko uzupełnił węgiel ze złóż kopalnych, powszechnie wykorzystywany do wytwarzania ciepła

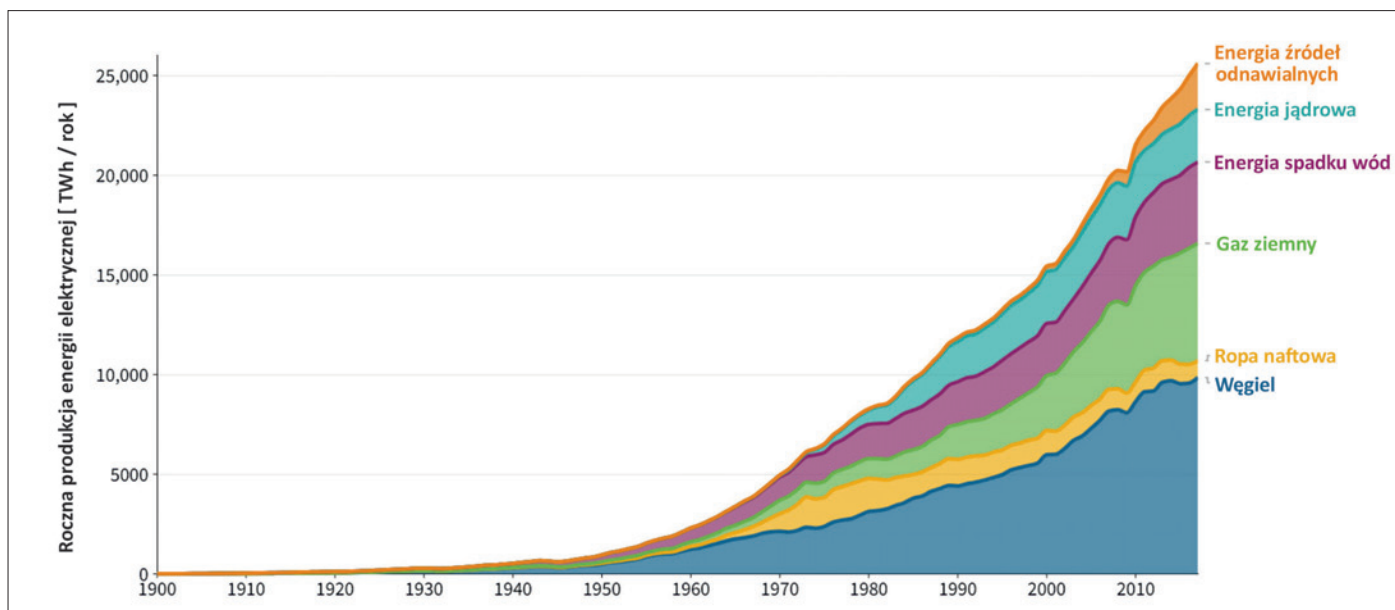
w tłokowych silnikach parowych: w napędach maszyn w fabrykach oraz transporcie wodnym i kolejowym (patrz rys. 1). Od początku XX wieku do miksu energii pierwotnej dołączyło coraz szersze wykorzystanie paliw węglowodorowych: ropy naftowej i jej produktów pochodnych oraz gazu ziemnego. Rozpoczęta w latach 1880-tych wielkoskalowa elektryfikacja od początku włączyła do nowoczesnego miksu energetycznego pierwszy rodzaj energii odnawialnej: energię spadku wód. Pierwszą na świecie dużą elektrownię wodną Edward Dean Adams Power Plant o mocy 37 MW zbudowano w 1895 roku na wodospadzie Niagara w stanie Nowy Jork. Równolegle powstawały coraz większe elektrownie węglowe napędzane silnikami parowymi: tłokowymi i turbinowymi. Na przykład w roku 1908 stolicę cesarskich Niemiec – Berlin zasilaly cztery elektrownie o łącznej mocy 103 MW, w których w sumie zainstalowano 135 kotłów dostarczających pary dla 52 parowych silników tłokowych i turbin napędzających 75 prądnic prądu stałego i przemiennego.



◀ Rys. 1. Współdziałanie odnawialnych źródeł energii ze źródłami bazującymi na wykorzystaniu energii jądrowej stanowi optymalne rozwiązanie z punktu widzenia uzyskania bezemisyjności i stabilnej pracy systemu energetycznego. Na zdjęciu: na pierwszym planie duża instalacja fotowoltaiczna, zaś w tle dwa energetyczne bloki jądrowe typu Westinghouse Electric AP1000 w EJ Haiyang w Chinach (fot. Setao)

▼ Rys. 2. Wykres ilustrujący wzrost zapotrzebowania na energię pierwotną w Stanach Zjednoczonych od uzyskania przez ten kraj niepodległości w 1776 r. do czasów nam współczesnych. Obejmuje on wszystkie rodzaje wykorzystywanej energii – ciepła do ogrzewania domów, uzyskiwania energii cieplnej i mechanicznej w produkcji przemysłowej, paliw dla środków transportu o napędach mechanicznych i wreszcie (od lat 1880-tych) generacji energii elektrycznej. Wartości energii na osi pionowej podane w kilowatogodzinach ($\times 10^{12}$ kWh) oraz BTU (ang. British Thermal Units; $\times 10^{15}$ BTU). W 2022 r. poziom energii pierwotnej uzyskiwanej paliw kopalnych (węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego) wciąż wynosił ok. 79%, podczas gdy energii jądrowej (uran) i energii odnawialnej łącznie ok. 21% (rys. US Energy Information Agency, opisy polskie autora)





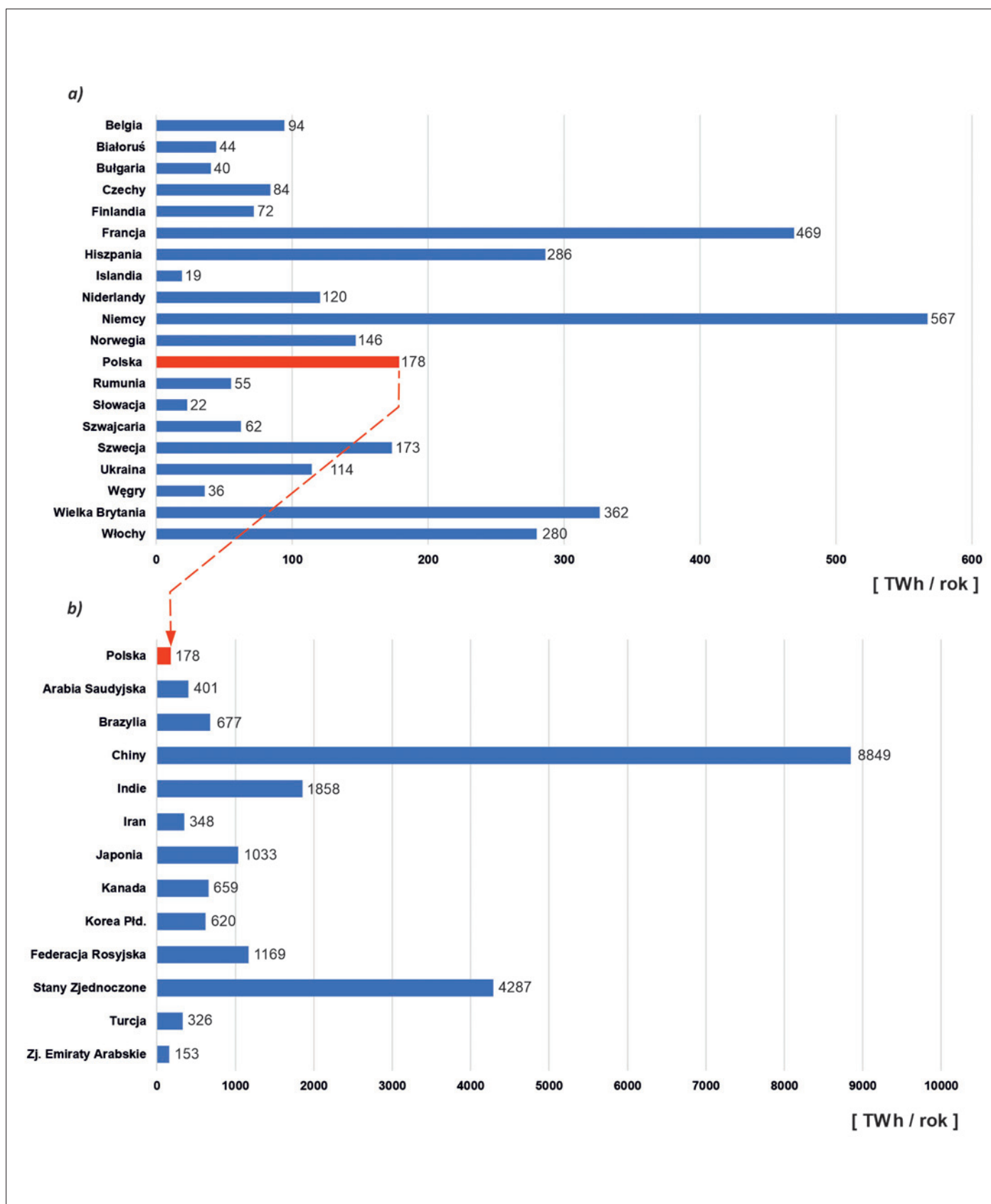
Rys. 3. Wykres zmian energii elektrycznej produkowanej rocznie na całym świecie od roku 1900 (wówczas, jak się szacuje, wytworzono na całym globie 66,4 TWh) do czasów obecnych z podziałem na miks energetyczny dla poszczególnych rodzajów wytwarzania: z energii podstawowych paliw kopalnych (węgiel, ropy naftowej i gazu ziemnego), energii spadku wód (hydroelektrownie), energii jądrowej i energii ze źródeł odnawialnych (rys. Boston University Institute for Global Sustainability, opisy polskie autora)

W 1900 r. światowa produkcja energii elektrycznej wyniosła około 66,4 terawatogodzin (TWh). Ponad 120 lat później – w ciągu roku 2022 cały świat wytworzył już 28 728 TWh energii, a zatem ponad 430 razy więcej niż w 1900 r. W rzeczonym okresie udział energii elektrycznej w światowym zużyciu energii pierwotnej wzrósł z 0,1% do 22%. Podstawę produkcji energii elektrycznej na świecie stanowi w dalszym ciągu węgiel w 35%, za którym podąża gaz ziemny – 22,65% oraz pozostałe paliwa kopalne (w tym mazut i inne produkty ropopochodne) – 3,06%. Elektrownie jądrowe dostarczają zaledwie 9,19% wytworzonej energii. Pozostała część pochodzi ze źródeł odnawialnych: hydroelektrownie – 14,94%, elektrownie biomasowych – 2,34%, słonecznych – 4,59% oraz wiatrowych – 7,28%.

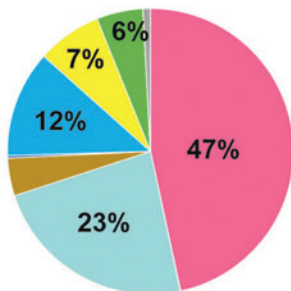
Industrializacja i elektryfikacja postępują w bardzo szybkim tempie, choć dotyczą przede wszystkim gęsto zaludnionych obszarów wschodniej części Azji, a nie – jak w ubiegłym stuleciu – Europy i Ameryki Północnej. W ciągu pierwszych 23 lat XXI wieku ilość wytwarzanej na świecie energii elektrycznej wzrosła blisko 1,9-krotnie. Co ciekawe, aż 84% całej energii elektrycznej w skali świata wytwarzane jest w krajach należących do grupy G20 obejmującej najpotężniejsze gospodarki świata.

A jak na tym tle przedstawia się sytuacja Europy, a w szczególności Unii Europejskiej? W roku 2023 wszystkie 27 krajów UE wytworzyło razem ok. 2694 TWh energii elektrycznej co stanowi 9,38% produkcji światowej. Co ciekawe, ilość wytwarzanej tu corocznie energii nieznacznie zmieniła

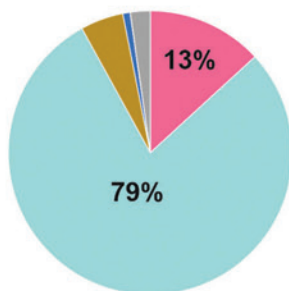
się w porównaniu do stanu z początku stulecia. Poziom produkcji zmieniał się nieznacznie rosnąc do 2008 r. i od tam systematycznie, choć powoli spadając. Paradoksalnie najwięcej energii elektrycznej w krajach Unii wciąż pochodzi z elektrowni jądrowych: aż 22,96%. Stanowi to dziedzictwo konsekwentnego rozwoju energetyki jądrowej w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych zarówno w krajach dawnej Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej, jak i byłych krajach socjalistycznych (za wyjątkiem Polski). Gdyby nie zahamowanie tej gałęzi energetyki, na skutek splotu przyczyn, o których będzie jeszcze mowa w dalszej części artykułu, udział ten mógłby być w Europie jeszcze większy (w 2000 r. wynosił on w miksie UE 32,80%). W energetyce europejskiej stale maleje udział paliw kopalnych. Udział węgla zmniejszył się z 30,53% w roku 2000 do 12,47% obecnie. Mniejszy jest również procentowy udział gazu ziemnego w miksie: zmniejszył się on z 16,68% do 12,53%. Jednak najbardziej spektakularną zmianą jest wzrost udziału nowoczesnych odnawialnych źródeł energii. W 2000 r. elektrownie wiatrowe wytworzyły zaledwie 0,81% energii, podczas gdy obecnie, po rewolucji związanej z rozwojem najpierw lądowej a następnie morskiej energetyki wiatrowej, sięgnęły one w 2023 r. poziomu aż 17,47%. W roku 2000 udział fotowoltaiki i innych rodzajów elektrowni słonecznych w produkcji elektryczności w Europie praktycznie był równy zero. Obecnie stanowi on liczące się 9,17%. Warto też odnotować wzrost energii generowanej z biomasy z 1,15% w roku 2000 do 5,63% obecnie.



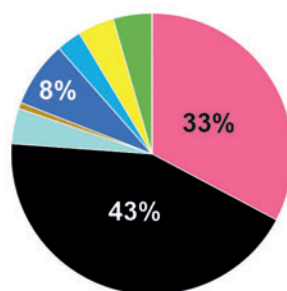
Rys. 4. Porównanie ilości energii elektrycznej wytworzonej w 2022 r. w 20 wybranych krajach Europy (część górna) – w tym Polski oraz 12 wybranych krajach świata (część dolna). Dla porównania „słupek” dla Polski umieszczony jest w obu zestawieniach (rys. opracowanie autora na podstawie bazy danych Ember Electricity Data Explorer)



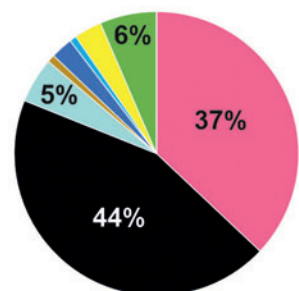
Belgia



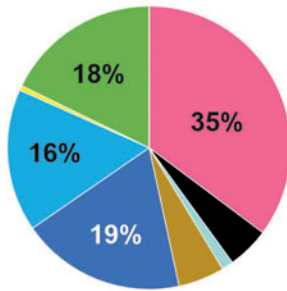
Białoruś



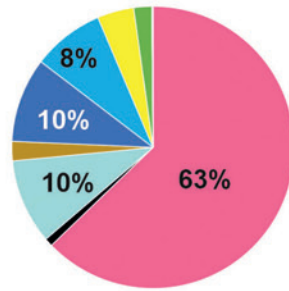
Bułgaria



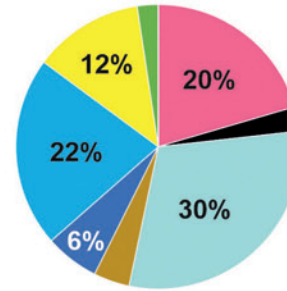
Czechy



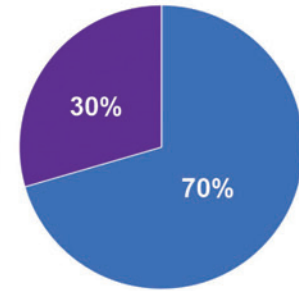
Finlandia



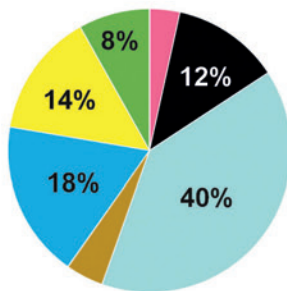
Francja



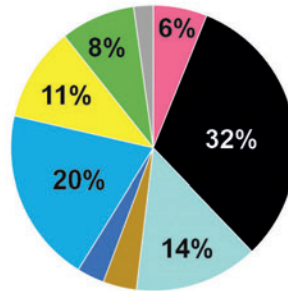
Hiszpania



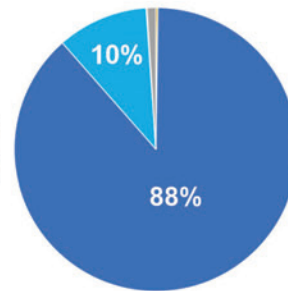
Islandia



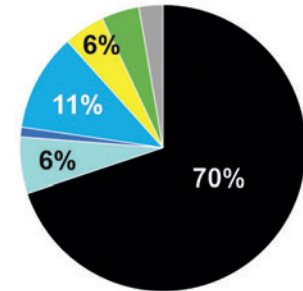
Niderlandy



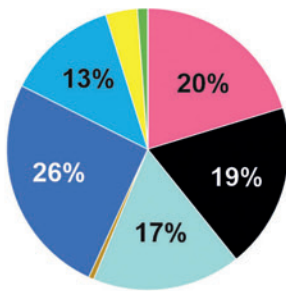
Niemcy



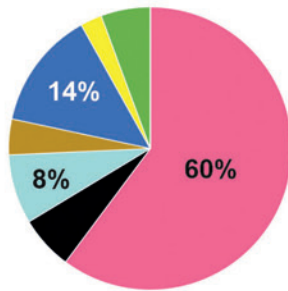
Norwegia



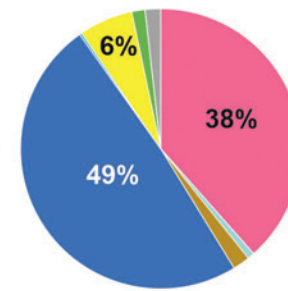
Polska



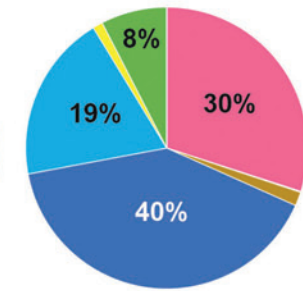
Rumunia



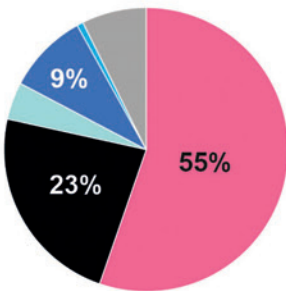
Słowacja



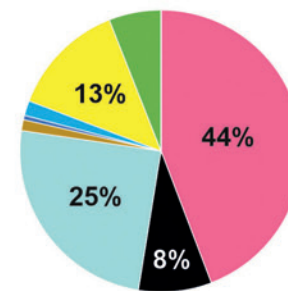
Szwajcaria



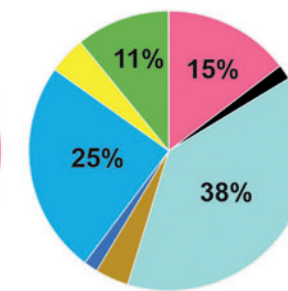
Szwecja



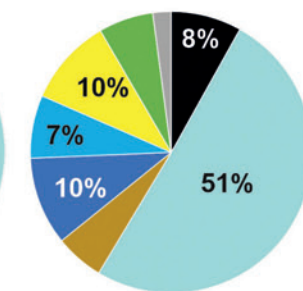
Ukraina



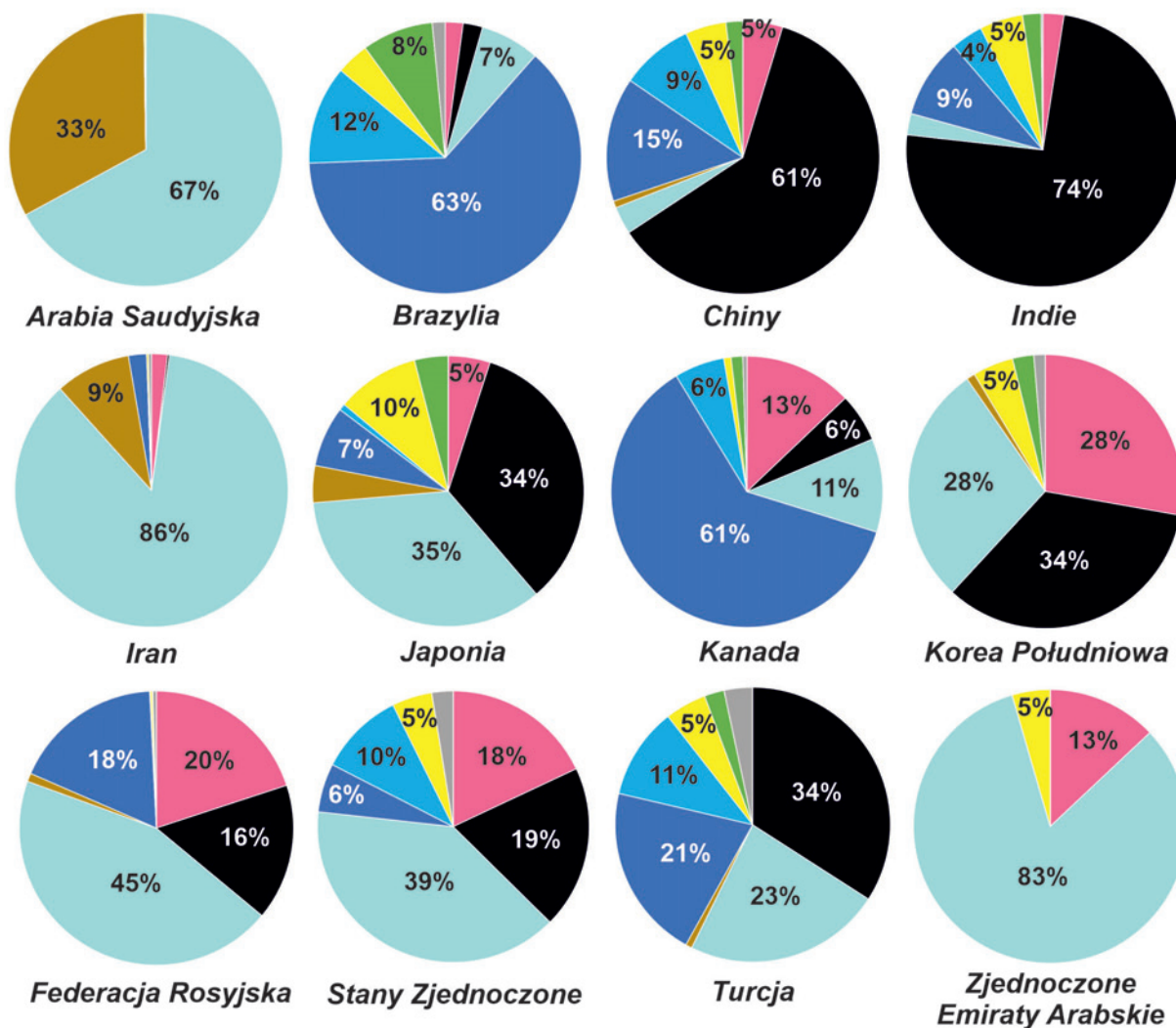
Węgry



Wielka Brytania



Włochy



Rodzaje elektrowni:

- jądrowe
- węglowe (węgiel kamienny i brunatny)
- gazowe
- opalane mazutem i in. paliwami ropopochodnymi
- wodne (przepływowe, pływowe, inne)
- elektrownie wiatrowe (lądowe i morskie)
- fotowoltaiczne i inne słoneczne
- opalane biomasą, biogazem, odpadami
- geotermiczne
- inne

Rys. 5. Miks dla generacji energii elektrycznej wytworzonej w 2022 r. w 20 wybranych krajach Europy (z lewej) i 12 wybranych krajach pozaeuropejskich – w tym Rosji i Turcji leżących częściowo na Starym Kontynencie (z prawej). Wartości procentowe zaokrąglone zostały do pełnych jednostek. Dla czytelności wykresu wartości poniżej 5% nie są opisane (rys. opracowanie autora na podstawie bazy danych Ember Electricity Data Explorer)

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie miksu energetycznego w 20 wybranych krajach europejskich w 2022 r. [1]. Warto przyjrzeć się tym wykresom pod kątem możliwości osiągnięcia postulowanej bezemisyjności. Niektóre państwa

praktycznie bezemisyjność tą osiągnęły i to już dość dawno temu, głównie dzięki panującym w nich sprzyjającym warunkom naturalnym. Na przykład energetyka Norwegii od ponad stu lat bazuje w dominującej części na hydroelektrowniach

uzupełnionych ostatnio energetyką wiatrową. Podobnie wygląda to na górzystej i wulkanicznej Islandii, gdzie energetykę wodną wspierają elektrownie wykorzystujące energię geotermiczną. Znakomite udziały energii spadku wód mają w swych miksach energetycznych także Szwecja i Szwajcaria.

Pod względem obecności w miksie energii jądrowej wśród krajów Europy Zachodniej prym wiedzie Francja, gdzie z atomu wytwarzane jest ponad 60% energii elektrycznej. Duże udziały posiadają tu również Belgia i Hiszpania. Miks energetyczny byłych krajów socjalistycznych, tj. Bułgarii, Czech, Słowacji, Słowenii i Rumunii w dużym stopniu opiera się na energetyce jądrowej. Spośród krajów powstałych po rozpadzie ZSRR największy udział energii jądrowej, bo przekraczający aż 50% ma Ukraina. Białoruś dysponuje tą gałęzią energetyki od niedawna – dzięki uruchomieniu w ostatnim czasie EJ w Ostrowcu.

Na Starym Kontynencie poważniejsze uzależnienie miksu energetycznego od spalania węgla pośród dużych gospodarek mają wg danych z 2022 r. Polska (70%) i Niemcy (32%). Dwa znacznie mniejsze kraje – Bułgaria i Czechy też wciąż znacząco polegają na energetyce węglowej. Można pokusić się o stwierdzenie, że w kilku krajach europejskich, przede wszystkim we Włoszech, Wielkiej Brytanii, Niemczech i Hiszpanii, rolę węgla dość szybko i skutecznie zastąpił gaz ziemny – technologia czystsza choć wciąż emisyjna.

Europa jest w skali światowej niewątpliwym liderem w dziedzinie technologii energii odnawialnej. Nowoczesna energetyka wiatrowa narodziła się w Danii – pierwsze decyzje o zainwestowaniu w tą dziedzinę technologii generacyjnych podjęto tu po kryzysie naftowym w 1973 r. Obecnie duńskie elektrownie wiatrowe zapewniają aż 57% energii elektrycznej wytwarzanej w ciągu roku. Za Danią podążają: Wielka Brytania (25%), Niemcy (20%), Szwecja (19%) i Niemcy (18%). Druga wiodąca technologia energetyki odnawialnej – fotowoltaika i inne rodzaje przetwarzania energii promieniowania słonecznego na elektryczność posiadają największe udziały w Niemczech (14%), na Węgrzech (13%), w Hiszpanii (12%), Niemczech (11%) i Włoszech (10%).

A jak przedstawia się mikś energetyczny w wiodących gospodarkach pozaeuropejskich? Przede wszystkim zwróćmy jednak uwagę na zmianę skali w stosunku do energetyki europejskiej. Powróćmy na chwilę do rysunku 4. Ilość energii generowanej rocznie w Chinach jest prawie 50-krotnie większa niż w Polsce, blisko 16-krotnie większa niż w Niemczech – największej gospodarce UE i ok. 2-krotnie większa niż w Stanach Zjednoczonych, do niedawna liderze rynku światowego. Zerknijmy na rysunek 5. Węgiel wciąż zajmuje pozycję dominującą w energetyce Chin (61%) i Indii (74%). Jest bardzo ważny dla wytwarzania energii w dwóch mniejszych gospodarkach

Dalekiego Wschodu: Japonii (34%) oraz Korei Południowej (również 34%). Energetyka Stanów Zjednoczonych w 19% również polega na spalaniu węgla, mimo mocnej pozycji elektrowni jądrowych i gazowych.

Państwa o dogodnych warunkach naturalnych dla energetyki wodnej są w stanie wygenerować ponad połowę całej puli energii elektrycznej w hydroelektrowniach zbudowanych nad wielkimi rzekami – jak np. Brazylia (63%) czy Kanada (61%). Nie sposób tu nie wspomnieć o potężnych hydroelektrowniach w Chinach (np. Tama Trzech Przełomów z elektrownią wodną o mocy zainstalowanej 22,5 GW!), choć w gigantycznej skali energetyki Państwa Środka ten rodzaj generacji zajmuje zaledwie 15%. Warto zauważyć, że potężną rolę w wielu gospodarkach ma gaz ziemny. Prym wiodą tu kraje posiadające własne złoża – mocarstwa bliskowschodnie: Iran (86%), Zjednoczone Emiraty Arabskie (83%) i Arabia Saudyjska (67%), ale również: Federacja Rosyjska (45%) i Stany Zjednoczone (39%). Duże energetyki Dalekiego Wschodu bazują w sporej części na gazie importowanym: Japonia (38%) i Korea Południowa (28%). Niektóre z krajów Zatoki Perskiej jak np. Arabia Saudyjska i Iran wciąż wykorzystują swe potężne zasoby surowej ropy naftowej do spalania w elektrowniach. Duże udziały energii jądrowej w miksie energetycznym mają pośród dużych gospodarek pozaeuropejskich tylko Korea Południowa (28%), Federacja Rosyjska (20%), Stany Zjednoczone (18%) i Kanada (13%). Poza Europą widoczny jest znacznie słabszy trend rozwoju energetyki wiatrowej i słonecznej. Istotne udziały energetyki wiatrowej w swych mikсах mają: Brazylia (12%), Turcja (11%), USA (10%) i Chiny (9%). Energetyka słoneczna ma silną pozycję w Japonii (10%), w innych gospodarkach nie przekraczając kilku procent.

MAGAZYNOWANIE ENERGII

Uważane często błędnie za nowość, magazynowanie energii pojawiło się w elektroenergetyce już u jej zarania. Pierwsze stałoprądowe systemy Edisona w końcu XIX w. wyposażone były w prądnice pracujące równolegle z bateriami akumulatorów. Ostatecznie w rywalizacji nazwanej „wojną prądów” toczoną przez Edisona i Westinghouse’a zwycięstwo odniosły systemy prądu przemiennego – głównie dzięki możliwości łatwego podwyższania i obniżania napięcia w transformatorach, co otwierało drogę do dalekosiężnego przesyłu na wyższym napięciu i tym samym przy niższych stratach. Magazynowanie energii w systemie prądu przemiennego było jednak trudniejsze. Sumaryczna moc elektrowni pracujących w systemie była w praktyce równa mocy pobieranej przez wszystkich odbiorców plus straty mocy w sieciach przesyłowych i rozdzielczych. Stosunkowo wcześniej pojawiła się idea wykorzystania energii potencjalnej dużych mas wody

do magazynowania energii podczas nocnych i dziennych dolin obciążenia i wykorzystanie zgromadzonych nadwyżek w szczytach porannych i wieczornych. Pierwszą elektrownię szczytowo-pompową *Engeweiher* zbudowano w pobliżu miejscowości Schaffhausen w Szwajcarii już w 1907 r.

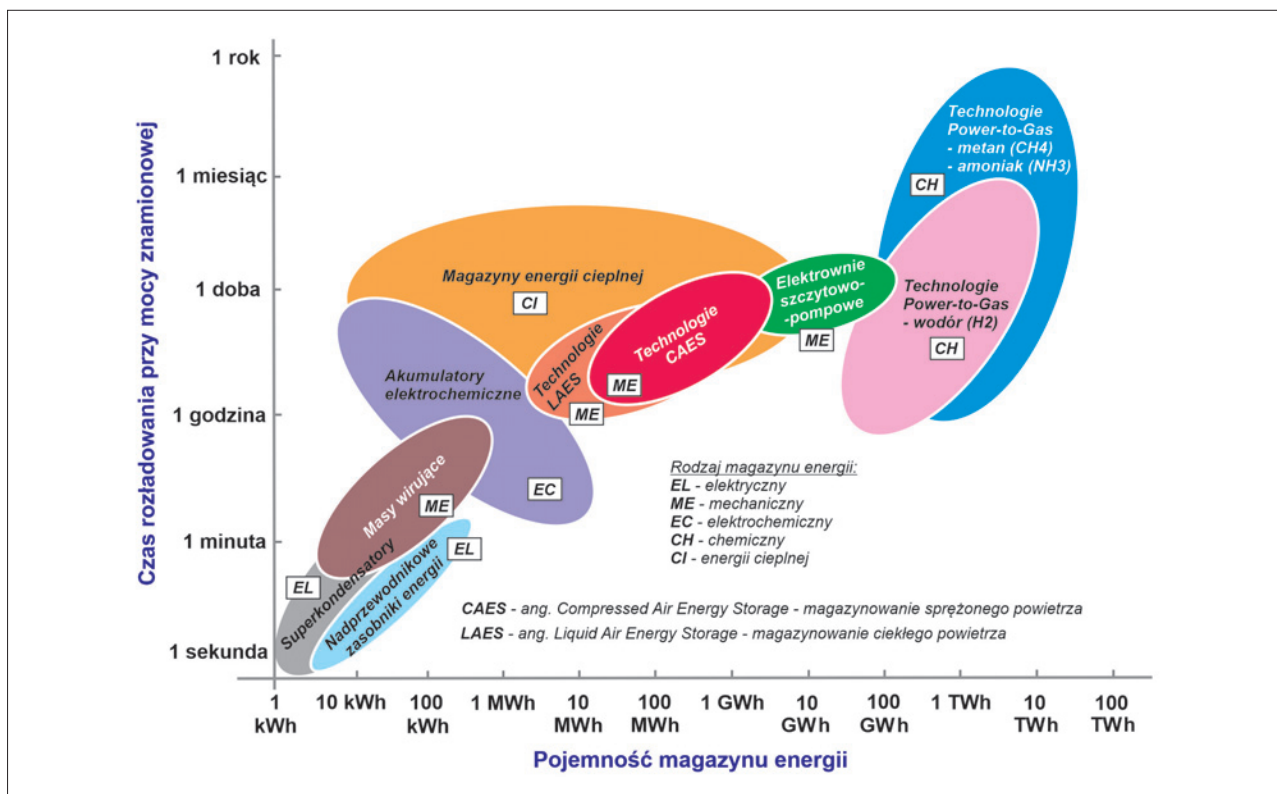
W trzeciej dekadzie XXI wieku magazynowanie wielkich ilości energii elektrycznej zaczyna być obecne na wszystkich etapach łańcucha jej wytwarzania, przesyłu, dystrybucji i wykorzystywania [6]. Idea współpracy magazynów energii z systemem elektroenergetycznym (krajowym, lokalnym, przemysłowym, wyspowym) polega na odbieraniu i magazynowaniu energii ze źródeł (przede wszystkim odnawialnych) w okresach, gdy wytwarzają one nadwyżkę mocy, której nie są w stanie zużyć pracujące w systemie odbiorniki energii i oddawaniu mocy wówczas, gdy występuje jej deficyt wynikający np. ze słabego wiatru bądź silnego zachmurzenia.

Wielkoskalowe magazynowanie energii jest domeną energetyki zawodowej. W generacji magazyny energii pomagają zapewnić ciągłość zasilania, wyrównując nieprzewidywalną i nieregularną pracę źródeł odnawialnych oraz pomagają poradzić sobie ze sprostaniem szczytom zapotrzebowania. W systemie przesyłowym magazynowanie energii pozwala na bardziej elastyczną pracę, co umożliwia odroczenie inwestycji związanych ze zwiększaniem przepustowości linii wysokich

napięć i zmniejszenie ich bieżących obciążeń prądowych. Podobnie w obszarze dystrybucji magazyny energii odciążają sieć średnich napięć, zapewniają zapasowe źródła zasilania na wypadek awarii i wspierają pracę mikro sieci. Praktycznie wszędzie w systemie elektroenergetycznym prądu przemiennego magazyny energii dają również możliwość kompensacji wahań napięcia i stabilizacji częstotliwości. Wiodącymi krajami w dziedzinie zastosowania wielkoskalowych magazynów w energetyce zawodowej są obecnie Stany Zjednoczone, Wielka Brytania i Australia.

Zadanie magazynowania energii elektrycznej może być realizowane na wiele sposobów. Na rysunku 6 poglądowo pokazano dostępne dla współczesnej techniki rodzaje magazynów energii, z których większość może zostać wykorzystana wielkoskalowo, tj. na potrzeby energetyki zawodowej. Są to:

- **Elektryczne** magazyny energii z superkondensatorami lub nadprzewodnikowymi zasobnikami energii;
- **Mechaniczne** magazyny energii wykorzystujące energię kinetyczną ruchu obrotowego mas wirujących (kół zamachowych), energię potencjalną masy wody przemieszczanej do górnego zbiornika w elektrowni szczytowo-pompowej, czy też energię sprężonego powietrza atmosferycznego – CAES (ang. *Compressed Air Energy Storage*) lub skroplonego powietrza – LAES (ang. *Liquid Air Energy Storage*);



Rys. 6. Czas rozładowania przy mocy znamionowej w funkcji pojemności magazynu energii dla różnych rodzajów technologii (rys. autora)

- **Elektrochemiczne** magazyny energii z bateriami akumulatorów (trzy wiodące technologie to: akumulatory kwasowo-ołowiowe, litowo-jonowe i przepływowo);
- Magazyny **energii cieplnej** wykorzystujące np. stopioną sól (MSES – ang. *Molten Salt Energy Storage*);
- Grupa technologii **Power-to-Gas** służących przetwarzaniu energii elektrycznej w energię syntetycznych paliw gazowych – głównie wodoru, metanu i amoniaku w celu ich składowania i późniejszego wykorzystania w ogniach paliwowych lub różnych rodzajach silników turbinowych.

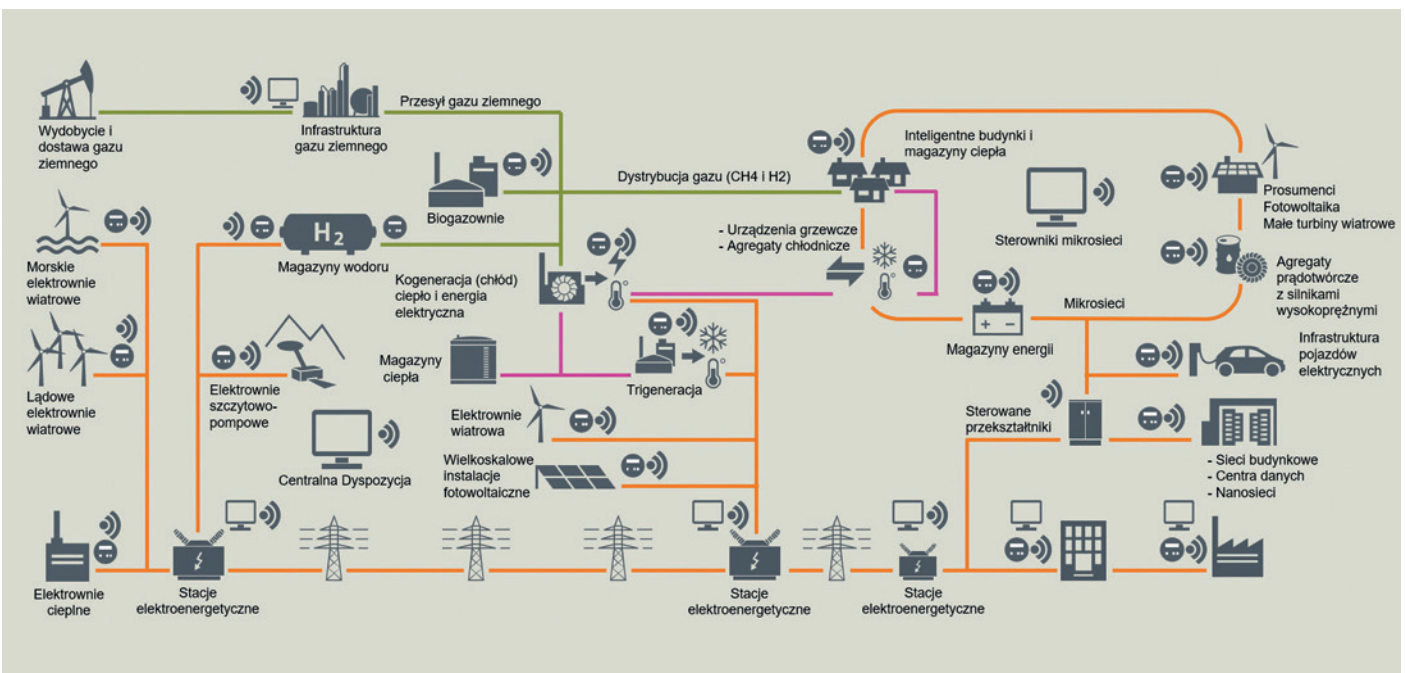
Magazynowanie energii stało się nieodłącznym elementem koncepcji energetyki przyszłości integrujących:

- klasyczne systemy wielkoskalowej generacji energii elektrycznej (w elektrowniach ciepłych),
- systemy rozproszonej energetyki odnawialnej – wiatrowej, słonecznej, biomasowej;
- elektryczne sieci przesyłowe (najwyższych i wysokich napięć) i dystrybucyjne (średnich i niskich napięć);
- systemy wydobywania, przesyłu i dystrybucji gazu ziemnego;
- systemy energetyki wodorowej (wytwarzanie: elektroliza i wysokotemperaturowe procesy chemiczne [5]; przesył, dystrybucja i magazynowanie, przetwarzanie na energię elektryczną w ogniach paliwowych i spalanie bezemisyjne w silnikach turbinowych);

- systemy kogeneracji (energia elektryczna i ciepło) i trigeneracji (energia elektryczna, ciepło i chłód);
- systemy ładowania pojazdów elektrycznych;
- magazyny energii elektrycznej i magazyny ciepła;
- mikrosieci.

Na rysunku 7 zaprezentowano przykładową wizję takiego właśnie systemu zaproponowanego przez firmę *Siemens Energy*. Intensywne prace badawcze w tym obszarze prowadzone są głównie w Niemczech i Stanach Zjednoczonych. Nieodłączną cechą systemów energetycznych przyszłości staną się układy sterowania i nadzoru pozwalające na wymianę informacji w czasie rzeczywistym na temat mocy dostępnych w systemie, a także zapotrzebowania występującego po stronie odbiorców [2]. W założeniu sterowanie takie przyczynić się ma do znacznego wzrostu efektywności energetycznej.

Idea transformacji energetycznej – niem. *Energiewende* wdrażana u naszych zachodnich sąsiadów już od kilkunastu lat ma na celu, wbrew obiegowej opinii, nie tylko budowę energetyki generacyjnej opartej na nowoczesnych źródłach odnawialnych – wiatrowych i słonecznych [7]. Włączono doń ambitne zadania rozbudowy elektrycznych sieci przesyłowych i rozdzielczych, w tym także linii przesyłowych stałoprądowych HVDC (ang. *High Voltage Direct Current*), budowę podstaw energetyki wodorowej i oczywiście rozmaitych



Rys. 7. Wizja sieci energetycznej przyszłości autorstwa specjalistów firmy *Siemens Energy*. Koncepcja ta uwzględnia integrację konwencjonalnej energetyki bazującej na dużych elektrowniach ciepłych z generacją rozproszoną bazującą na źródłach odnawialnych, sieciami gazowymi (gaz ziemny a docelowo także wódór), nowoczesnymi systemami kogeneracji i trigeneracji, mikrosieciami i infrastrukturą ładowania pojazdów elektrycznych (rys. *Siemens Energy*)

systemów magazynowania energii. Założono w niej wyjście z energetyki jądrowej przy jednoczesnym wprowadzaniu do pracy w podstawie systemu elektrowni gazowych: prostych i szybkich w budowie, względnie łatwych w eksploatacji, o wysokiej dyspozycyjności, sprawności (szczególnie układy paro-gazowe pracujące w skojarzeniu – sprawność ok. 60%) i szybkim rozruchu. Elektrownie gazowe pozwoliłyby na wyeliminowanie innych rodzajów elektrowni ciepłych – głównie węglowych i jądrowych w oczekiwaniu, aż kolejne dziesięciolecia przyniosą skuteczne i wysoce efektywne rozwiązania w dziedzinie magazynowania energii. Problem dostaw paliwa załatwiono poprzez długoletnie umowy z Federacją Rosyjską i budowę podmorskich gazociągów Nordstream 1 i 2 pomiędzy Rosją a Niemcami. Epilog „gazowej” części *Energiewende* znamy z codziennych doniesień agencji z ostatnich dwóch lat – dostawy surowców energetycznych z Rosji po wybuchu wojny na Ukrainie świat zachodni objął częściowym embargiem, a oba rurociągi na dnie Morza Bałtyckiego zostały poważnie uszkodzone w niewyjaśnionych do końca okolicznościach...

POWRÓT ENERGETYKI JĄDROWEJ – WOJNA UKRAIŃSKA KATALIZATOREM ZMIAN

Lata sześćdziesiąte i siedemdziesiąte ubiegłego stulecia były bez wątpienia „złotym” okresem światowej energetyki jądrowej. Panowało dość powszechne, optymistyczne przekonanie, że w bliskiej przyszłości atom stanie się wiodącym rodzajem energetyki generacyjnej. W Stanach Zjednoczonych, kraju będącym ojczyzną tej technologii, rozpoczęto wówczas budowę ponad 100 bloków elektrowni jądrowych. Francja zdecydowanie postawiła na energetykę jądrową po pierwszym kryzysie naftowym w 1973 r. nazwanym nad Sekwaną *choc pétrolier*. Skokowy wzrost cen paliw ropopochodnych spowodował podjęcie niezwykle odważnych i dalekowzrocznych decyzji zrealizowanych w ramach tzw. Planu Messmera (od nazwiska ówczesnego premiera Francji – Pierre Messmera, 1916-2007) – szybkiej budowy zestandaryzowanych bloków na bazie rozwiązań firmy *Framatome* (fr. *Franco-Américaine de Constructions Atomiques*), która zapewniła skuteczną implementację własnych rozwiązań reaktorów ciśnieniowych wodnych (PWR) powstałych na bazie technologii zakupionej u amerykańskiego Westinghouse’a. Ostatecznie Francja zbudowała aż 58 bloków jądrowych skutecznie opierając na nich sektor generacji energii elektrycznej.

Pierwsze załamanie koniunktury przyniósł wypadek w amerykańskiej elektrowni Three Mile Island w pobliżu Harrisburga w Pensylwanii w marcu 1979 r. Wydarzenie to, choć nie pociągnęło za sobą ofiar śmiertelnych, położyło się głębokim cieniem na dalszym rozwoju energetyki jądrowej

w USA. W świecie zachodnim ówczesne protesty przeciwko zbrojeniom jądrowym scaliły się z kontestacją rozwoju energetyki atomowej. Dla powstającego wówczas społeczno-politycznego ruchu „Zielonych” przeciwdziałanie rozwojowi energetyki jądrowej stało się „mitem założycielskim”. Po siedmiu latach, kolejnym ciosem dla tej branży stała się katastrofa czarnobylska w 1986 r. I tym razem mimo względnie niewielkich strat ponownie rozbudziły się powszechne obawy społeczne. Wiele krajów europejskich całkowicie odwróciło się od energetyki jądrowej. Niektóre, jak np. Austria, posunęły się do absurdu wpisując zakaz budowy elektrowni jądrowych... do konstytucji. Wypadki w Three Mile Island i Czarnobylu z jednej strony sparaliżowały dynamiczny rozwój energetyki jądrowej, z drugiej jednak przyczyniły się do rozwoju bezpieczniejszych bloków jądrowych III generacji, takich jak AP1000, EPR, ESBWR i APR-1400.

W pierwszych latach XXI stulecia, panowało dość powszechne przekonanie co do rychłego ożywienia energetyki jądrowej, uzasadniane rosnącymi cenami paliw kopalnych i nowymi obawami dotyczącymi konieczności dotrzymania limitów emisji gazów cieplarnianych. Pojawił się wówczas termin renesansu energetyki jądrowej (ang. *nuclear renaissance*). Spodziewano się rozpoczęcia licznych budów nowych obiektów. We wrześniu 2010 r. urząd dozoru jądrowego Stanów Zjednoczonych (U.S. National Regulatory Commission) raportował, że otrzymał od amerykańskich firm energetycznych 18 wniosków o wydanie licencji na budowę i eksploatację łącznie 28 nowych bloków elektrowni jądrowych. Niecały rok później, na wiosnę 2011 r. uderzenie fali tsunami zniszczyło japońską elektrownię Fukushima Daiichi. Podobnie jak w przypadku Three Mile Island i Czarnobyla wypadek ten po raz trzeci zastopował światową energetykę jądrową.

Warto tu zauważyć, że niezależnie od koniunktury, energetyka jądrowa najlepiej rozwijała się w krajach, w których w dłuższych okresach panował społeczny, polityczny i gospodarczy konsensus oraz determinacja dla jej rozwoju – procesu kosztownego i długotrwałego, przynoszącego jednak w dalekosiężnej perspektywie znakomite korzyści. Dobrym przykładem może tu być Finlandia, od dziesięcioleci zdeterminowana w obronie własnej niezależności energetycznej od potężnego sąsiada – Rosji. Na Dalekim Wschodzie – w Japonii i Korei Południowej przez całe dziesięciolecia energetyka jądrowa stanowiła istotny czynnik rozwoju nowoczesnych, wysokouprzemysłowionych gospodarek bazujących na nowoczesnych technologiach, a funkcjonujących na względnie małych, gęsto zaludnionych terytoriach. Podobna motywacja była i jest nadal przyczyną dynamicznego rozwoju energetyki jądrowej w Chińskiej Republice Ludowej.

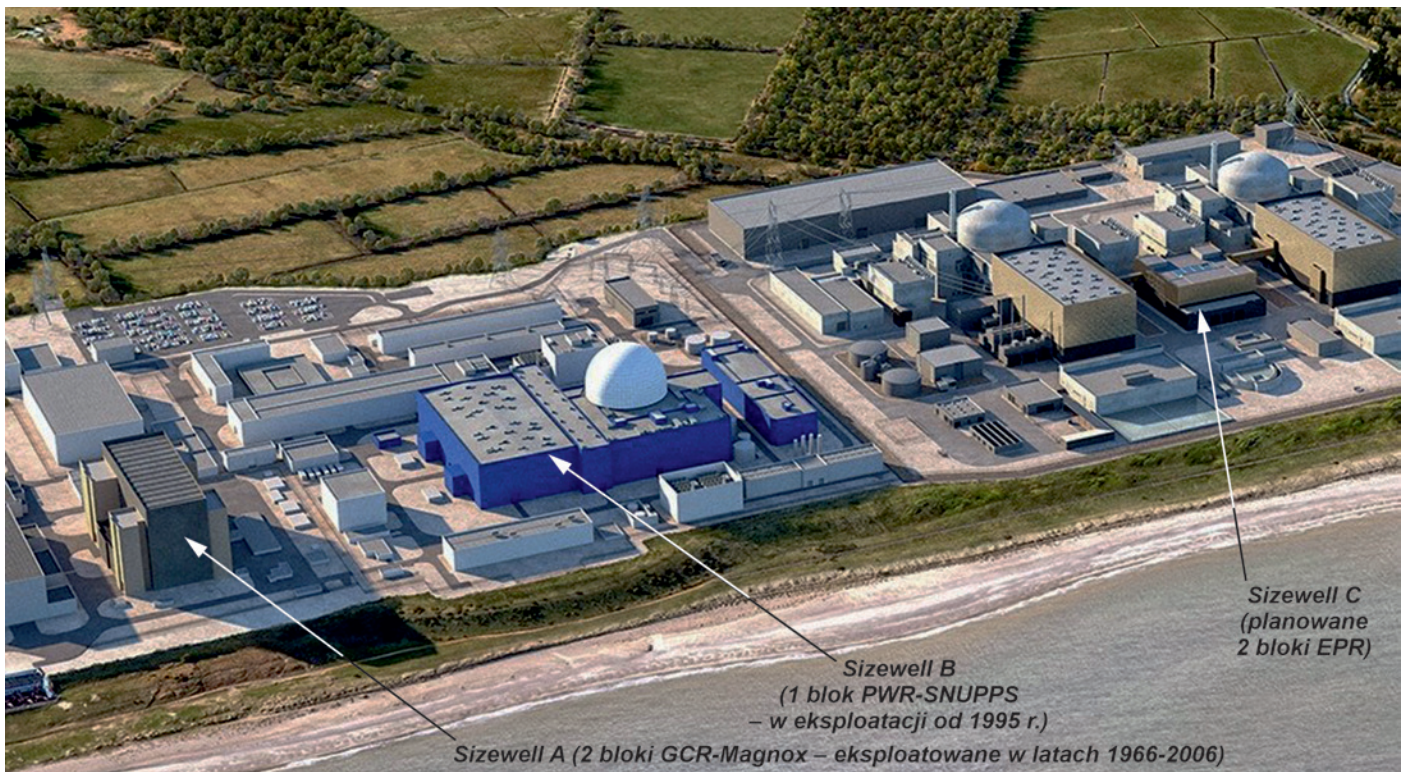
W drugiej dekadzie XXI stulecia w wielu krajach Unii Europejskiej uznano energetykę jądrową za „technologię schyłkową”. Trwała fascynacja rozwojem odnawialnych źródeł energii mających stać się panaceum na zapewnienie dostępności taniej energii elektrycznej, eliminację węgla z miksury energetycznego i tymczasowego zastąpienia go gazem ziemnym, do czasu szerokiego wprowadzenia systemów magazynowania energii. Uzyskanie wsparcia europejskiego sektora bankowego dla ewentualnej budowy elektrowni jądrowej na Starym Kontynencie było wówczas niezwykle mało prawdopodobne. Po 2011 r. największym zwolennikiem pełnego wyeliminowania energetyki jądrowej stały się Niemcy, realizujące wspomniany już wcześniej program *Energiewende*. W 2011 r. po katastrofie w Fukushima program docelowego wyłączenia wszystkich niemieckich elektrowni jądrowych stał się jedną z podstaw politycznego *dealu* kanclerz Angeli Merkel z partią „Zielonych”. Program wyłączania i demontażu jednych z najlepszych na świecie elektrowni jądrowych zrealizowano w Republice Federalnej według przyjętego harmonogramu z konsekwencją i uporem godnym lepszej sprawy. 31 grudnia 2021 r. wyłączono EJ Grohnde, Gundremmingen C i Brokdorf, zaś 15 kwietnia 2023 r. trzy ostatnie bloki ze znakomitymi reaktorami typu Konvoi: Isar 2, Emsland i Neckarwestheim 2, których eksploatacja mogła trwać jeszcze przez długie dziesięciolecia.

Niespodziewany „zwrot akcji” nastąpił po agresji Federacji Rosyjskiej na Ukrainę na początku 2022 r. Europejczycy zdali sobie sprawę, że kwestia dostępności surowców energetycznych z Rosji, w tym szczególnie gazu ziemnego, może z dnia na dzień stać się przedmiotem rozgrywek polityczno-gospodarczych. Zniszczenie dwóch nitek podmorskiego gazociągu Nordstream dostarczającego gaz bezpośrednio z Rosji do Niemiec stało się ostatecznym potwierdzeniem tego faktu. We Francji, Holandii, Szwecji i w Polsce w latach 2022-2023 stosunkowo szybko udało się powrócić do koncepcji rozwoju energetyki jądrowej. Nieco oporniej proces ten przebiegał w instytucjach unijnych. Ukoronowaniem zmiany nastawienia Parlamentu Europejskiego stało się włączenie energetyki jądrowej do grupy tzw. „zielonych technologii” w listopadzie 2023 r. Już wstępny projekt rozporządzenia dotyczącego przemysłu o zerowej emisji zaprezentowany 16 marca 2023 r. wymieniał energię jądrową jako środek dekarbonizacji gospodarki. To stanowiło pierwsze zwycięstwo Francji i kilku innych krajów, które postawiły na powrót do energetyki jądrowej. W praktyce dotyczyło to jednak tylko przyszłych reaktorów czwartej generacji i małych reaktorów modułowych (SMR), pozostających w fazie rozwoju. Ponadto większość funduszy unijnych zarezerwowana została dla ograniczonej listy tzw. sektorów „strategicznym”, z których wykluczono energetykę jądrową.

W chwili obecnej najbardziej ambitnymi planami rozwoju tej dziedziny energetyki w Europie może pochwalić się Francja. Współczesny blok EPR stać się ma bazą do opracowania dwóch nowych wersji pochodnych: EPR2 i EPR1200, o mocach elektrycznych netto wynoszących odpowiednio 1650 i 1200 MW. Blok z reaktorem mniejszej mocy ma być przeznaczony głównie na rynki eksportowe. W lutym 2022 roku prezydent Emmanuel Macron zapowiedział, że państwowy koncern *Électricité de France* (EDF) zbuduje sześć nowych reaktorów EPR2, z których pierwszy zostanie oddany do użytku w roku 2035, z opcją budowy ośmiu kolejnych. Warto tu zauważyć, że przed 2022 r. Macron był raczej zwolennikiem redukcji potencjału francuskiej energetyki jądrowej kosztem inwestycji np. w morskie elektrownie wiatrowe. Do lipca 2023 r. ogłoszone zostały trzy lokalizacje dla nowych jednostek generacyjnych typu EPR2. Będą to już istniejące elektrownie jądrowe: Penly w Normandii, Gravelines w departamencie Nord oraz Le Bugey w departamencie Ain we wschodniej Francji pomiędzy Lyonem a Genewą. Zgodnie z obecnymi planami EDF chciałby uruchomić pierwszą parę bloków w Penly w 2035 r., drugą w Gravelines w 2038 r. i trzecią w Bugey w 2042 r. Tymczasem już w połowie 2024 r. ma zostać wreszcie uruchomiony blok EPR w EJ Flamanville 3, którego budowa ciągnie się od 2007 r.

Zobaczmy teraz co dzieje się po drugiej stronie kanału La Manche. Na początku stycznia 2024 r. rząd brytyjski przedstawił plan działań dotyczący cywilnej energetyki jądrowej pod nazwą *Civil Nuclear Roadmap*. W Wielkiej Brytanii bardzo zaawansowana jest budowa EJ Hinkley Point C (HPC) na południowym wybrzeżu Anglii z dwoma blokami EPR. Pierwszy z nich ma być uruchomiony w roku 2026. W zaawansowanej fazie przygotowania znajduje się kolejna inwestycja – elektrownia Sizewell C w hrabstwie Suffolk (patrz rys. 8) stanowiąca niemal dokładną kopię elektrowni HPC. Wykorzystanie ekip budowlano-montażowych, sprawdzonych planów i rozwiązań z Hinkley Point C w założeniu pozwolić ma na dalsze przyspieszenie budowy. Kolejne brytyjskie lokalizacje dla nowych bloków jądrowych to: Moorside w hrabstwie Kumbria oraz teren sąsiadujący z nieczynną EJ Wylfa w Walii.

Kolejnym krajem, który podjął ostatnio systemowe rozwiązania dotyczące wznowienia budowy elektrowni jądrowych jest Szwecja. W latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w. było to jedno z pionierskich państw w energetyce jądrowej na Starym Kontynencie, budujące elektrownie m.in. na bazie własnej technologii opracowanej w ówczesnej firmie ASEA. Trzy działające obecnie szwedzkie elektrownie jądrowe z sześcioma czynnymi blokami energetycznymi, wytwarzają około 29,8% energii elektrycznej w kraju. Największa z nich, EJ Forsmark, wyposażona w trzy reaktory o sumarycznej mocy ok. 3,3 GW dostarcza 14% całego krajowego wolumenu energii elektrycznej.



Rys. 8. Wizja brytyjskiej elektrowni jądrowej Sizewell po planowanej rozbudowie o dwa nowe bloki EPR o mocy elektrycznej po 1650 MW każdy (Sizewell C). Dołączą one do bloku Sizewell B o mocy elektrycznej netto 1198 MW (rys. EDF)

Jesienią 2023 r. szwedzki rząd przedstawił plan działania, który przewiduje budowę do 2035 r. co najmniej dwóch dużych bloków energetycznych z reaktorami lekkowodnymi, a w perspektywie do 2045 r. nawet do 10 takich bloków (!). Rok wcześniej, w październiku 2022 r., na bazie konsensusu głównych szwedzkich partii politycznych zawarte zostało tzw. Porozumienie z Tidö. Dotychczasowa polityka energetyczna kraju określana jako docelowe „100% energii odnawialnej” została zmieniona na „100% energii bez wykorzystania emisyjnych paliw kopalnych”.

W Niderlandach – kraju o niewielkiej powierzchni i gęstym zaludnieniu, w którym miks energetyczny ma ogromny udział energii odnawialnej, zaczyna już po prostu brakować miejsca na kolejne elektrownie wiatrowe i fotowoltaikę. Wobec tego tamtejszy rząd postanowił powiększyć udział energii jądrowej w miksie generacyjnym. Jedyną działającą obecnie niderlandzka elektrownia jądrowa Borssele o mocy 485 MW została uruchomiona w 1973 r. Obecnie planowane jest wybudowanie w tej lokalizacji dwóch nowych, dużych bloków jądrowych, co jest elementem programu dążącego do osiągnięcia neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla w generacji energii elektrycznej.

W grupie kilku krajów „nowej Unii” w Europie Środkowo-Wschodniej: Czechach, Bułgarii i Węgrzech przygotowywane są inwestycje w duże bloki jądrowe. W połowie lipca 2024 r.

rząd Republiki Czeskiej wybrał ofertę firmy *Korean Hydro & Nuclear Power* na budowę nowych bloków elektrowni jądrowych Dukovany i Temelin na bazie reaktorów typu APR-1000. Oczekiwana wartość kontraktu na budowę pierwszych dwóch takich jednostek w Czechach ma wynieść 8,6 mld USD. Obecnie tamtejszy urząd antymonopolowy (UOHS cz. *Úřad pro ochranu hospodářské soutěže*) rozpatruje protesty producentów z USA i Francji, których oferty nie odniosły sukcesu w tym postępowaniu. W Bułgarii trwa przetarg na wykonawstwo dwóch bloków bazujących na technologii Westinghouse Electric AP1000. W listopadzie 2023 r. w Budapeszcie podpisano kontrakt na realizację budowy elektrowni Paks II na bazie rosyjskich reaktorów WWER-1200.

Polska nie ma w zasadzie wyboru. Energetyka węglowa musi być względnie szybko zastąpiona źródłami odnawialnymi i atomem, by zrealizować cele polityki klimatycznej Unii Europejskiej. Według danych Agencji Rynku Energii na koniec września 2023 r. w polskim systemie elektroenergetycznym działały źródła wytwórcze o mocy 64,4 GW, z czego moc źródeł odnawialnych wynosiła ok. 27 GW. Odnawialne źródła energii w ciągu roku 2023 powiększyły swój udział w krajowym miksie energetycznym z 20% do 27%, podczas gdy udział węgla skurczył się z 70% do 63%, osiągając najniższy poziom w dziejach polskiej energetyki. Udział gazu ziemnego w produkcji energii

elektrycznej osiągnął 10%. Ostatnie lata przyniosły dynamiczny rozwój fotowoltaiki prosumenckiej: łączna moc systemów energetyki słonecznej zainstalowana w Polsce wynosi aż 17 GW (stan na koniec grudnia 2023 r.). W dniu 9 lipca 2023 r. w południe chwilowy udział fotowoltaiki w wytwarzaniu energii elektrycznej w Polsce przekroczył poziom 50% mocy dostarczanej do systemu elektroenergetycznego – był on aż tak wysoki na skutek splotu sprzyjających okoliczności: pory roku (lato), pory dnia (południe) i dnia tygodnia (niedziela). Udział energii wytworzonej przez systemy fotowoltaiczne wzrósł z 5,7% w 2022 r. do 8,6% w 2023 r. Analogicznie wolumen energii elektrycznej uzyskiwanej z wiatru wzrósł z 11,5% do 14,4%. Polska energetyka wiatrowa zostanie w nadchodzących latach wzmocniona o 9 GW mocy zainstalowanej w morskich elektrowniach wiatrowych na Bałtyku. Zatem sukces energetyki odnawialnej w naszym kraju jest niezaprzeczalnym i zapewne niedocenianym faktem.

W energetyce jądrowej jedna, długo oczekiwana inwestycja – budowa trzech bloków energetycznych AP1000 w lokalizacji Lubiatowo-Kopalino [4] nie stanowi rozwiązania problemu. Konieczna będzie budowa drugiej, a być może trzeciej elektrowni jądrowej w środkowej lub południowej części Polski, przede wszystkim w celu zastąpienia wycofywanych w pierwszej kolejności bloków elektrowni opalanych węglem brunatnym. Do wzrostu udziału energii jądrowej w miksie energetycznym mogą przyczynić się również inicjatywy związane z wprowadzeniem reaktorów SMR, o których głośno było w ubiegłych kilku latach, głównie dzięki inicjatywom krajowych koncernów przemysłowych: *Orlenu*, *Synthosu* i KGHM-u. Wydaje się jednak, że w przypadku Polski kluczowe pytanie brzmi: jak długo będziemy mogli jeszcze w opłacalny sposób eksploatować elektrownie węglowe, by zapewnić w miarę możliwości płynne przejście do energetyki wolnej od emisji CO₂, bez jednoczesnego spowodowania załamania gospodarczego i ubóstwa energetycznego społeczeństwa?

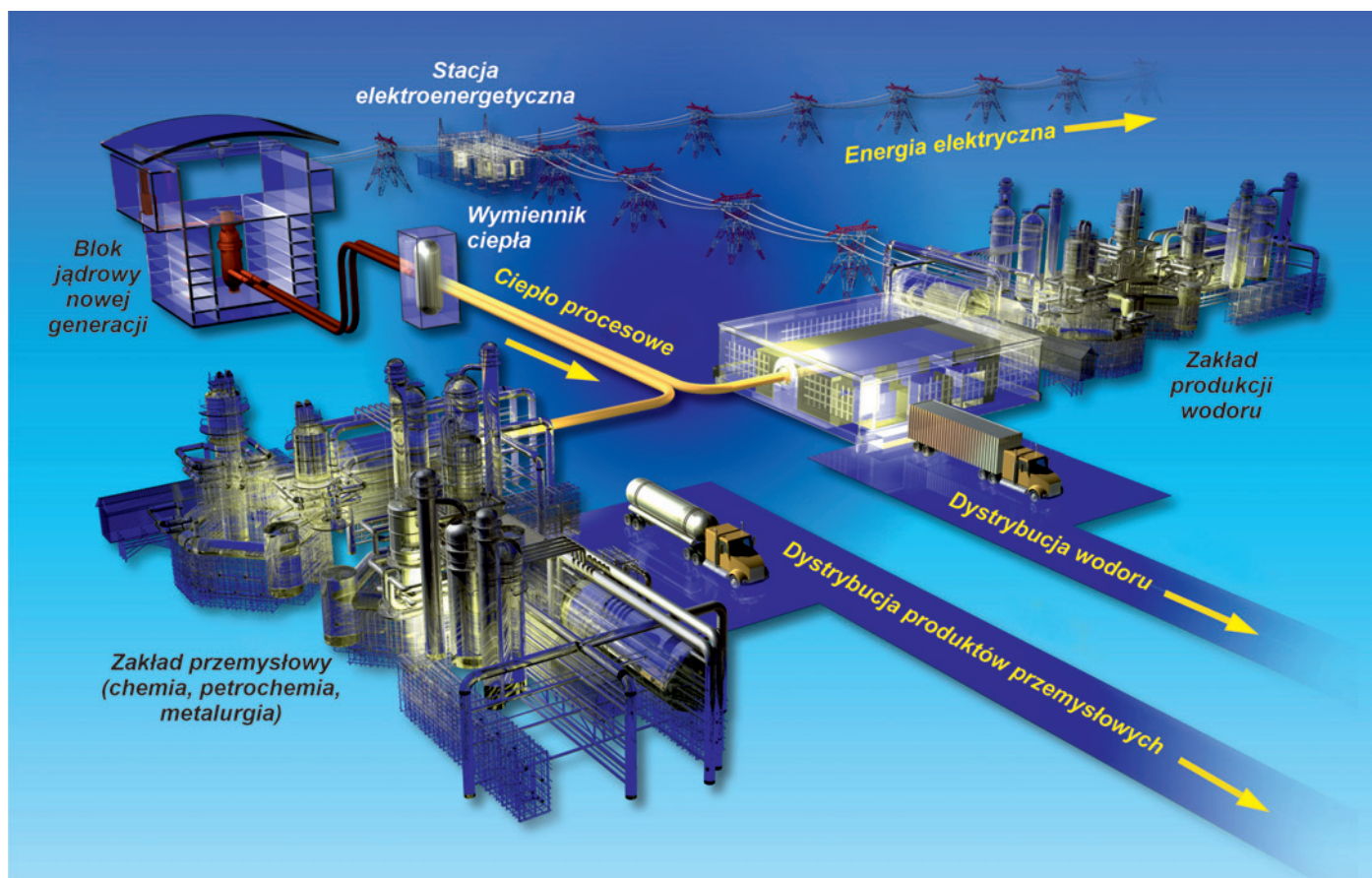
PRZYSZŁOŚĆ ATOMU POZA EUROPEJĄ

W Europie powrót do energetyki jądrowej wymusiła polityka klimatyczna Unii i związane z nią plany budowy bezemisyjnej gospodarki przyszłości, jak również następstwa wojny na Ukrainie i skreślenie Rosji z listy dostawców surowców energetycznych. Na kontynencie północnoamerykańskim sytuacja przedstawia się zgoła inaczej. Uruchomienie w ostatnich 20 latach eksploatacji gigantycznych złóż gazu ziemnego pochodzącego ze skał łupkowych otworzyło dostępność taniego paliwa, co w połączeniu z łatwością i szybkością budowy elektrowni gazowych stworzyło dla amerykańskich spółek energetycznych (w większości przedsiębiorstw prywatnych – zorientowanych na zysk) atrakcyjną alternatywę dla budowy kolejnych bloków

jądrowych. Co więcej w Ameryce Północnej nie ma tak wielkiego znaczenia system handlu emisjami, znany w Unii Europejskiej jako EU ETS (ang. *European Union Emissions Trading System*). Analogiczny doń system RGGI (ang. *Regional Greenhouse Gas Initiative*) funkcjonuje tylko w 11 stanach wschodniego wybrzeża USA. Oprócz tego uregulowania dotyczące emisji CO₂ obowiązują w Kalifornii. Ceny emisji CO₂ są w amerykańskim RGGI kilkukrotnie niższe niż w Europie.

Stany Zjednoczone pozostają światowym liderem pod względem liczby czynnych jądrowych reaktorów energetycznych, z których w eksploatacji pozostają 93 bloki zapewniające ok. 19% energii elektrycznej w miksie energetycznym kraju. Zdecydowana większość z nich została zbudowana jeszcze w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. W ostatnich miesiącach dobiegła końca budowa najnowszej amerykańskiej elektrowni jądrowej Vogtle 3 i 4 zbudowanej na bazie bloków Westinghouse Electric AP1000 [4]. 1 marca 2024 r. firma energetyczna *Georgia Power* ogłosiła, że blok Vogtle 4 został pomyślnie zsynchronizowany z siecią przesyłową. Dwa tygodnie wcześniej, 14 lutego uzyskał on po raz pierwszy stan krytyczny. Vogtle 4 uważany jest za blok referencyjny dla projektowanej obecnie w Polsce elektrowni Lubiatowo-Kopalino.

W Stanach Zjednoczonych i Kanadzie nie ma dziś praktycznie planów budowy nowych dużych bloków jądrowych. Największe zainteresowanie budzi tu rozwój „małego atomu” – bloków energetycznych na bazie reaktorów modułowych SMR (ang. *Small Modular Reactors*). Oprócz marketingowego sloganu „małe jest piękne” SMR-y prezentują rzeczywisty potencjał do jakościowej zmiany w energetyce jądrowej. Projektanci tych urządzeń w pewnym sensie podążają za jednym z kluczowych czynników sukcesu dwóch kategorii urządzeń dla energetyki odnawialnej: turbin wiatrowych i ogniw słonecznych dla fotowoltaiki. W ich przypadku techniczna i technologiczna wartość dodana uzyskiwana jest przede wszystkim na etapie produkcji przemysłowej. Zakład produkcyjny opuszcza gotowy produkt, do wytworzenia którego konieczne jest zaangażowanie nowoczesnych technologii (nieдоступnych lub bardzo kosztownych jeszcze kilka, kilkanaście lat temu), a jego montaż i instalacja na placu budowy są względnie proste i szybkie – można by wręcz powiedzieć „plug and play”. Podobny schemat powtarza koncepcja SMR-ów – najważniejsze komponenty reaktora i jego systemu chłodzenia zostają zintegrowane w kompletne moduły wykonywane w zakładzie przemysłowym i w całości dostarczane na plac budowy. Zmniejsza się w ten sposób ryzyko wystąpienia niespodziewanych problemów w miejscu zainstalowania urządzenia, gdzie lokalne kompetencje personelu oraz możliwości techniczne są nieporównywalnie niższe niż w warunkach przemysłowych.



Rys. 9. Elektrownia jądrowa nowej generacji będzie produkować ciepło i wodór na potrzeby produkcji przemysłowej, a także energię elektryczną dostarczaną do sieci energetyki zawodowej (rys. Idaho National Laboratory, opisy autora)

W EJ Darlington w prowincji Ontario w Kanadzie trwa już budowa dwóch bloków SMR typu General Electric Hitachi BWRX-300. W USA blok taki zamierza budować firma energetyczna *Tennessee Valley Authority*. Nie brakuje też niepowodzeń: jesienią 2023 r. firma *NuScale* producent nowatorskiego SMR-a integrującego kompletny obieg pierwotny reaktora ciśnieniowego-wodnego w jednej obudowie (docelowo 77 MW mocy elektrycznej brutto z pojedynczego bloku) była zmuszona przerwać realizację swego pierwszego projektu dla lokalnych zakładów energetycznych w stanie Utah. Projekt zakończył się fiaskiem z powodu rosnących kosztów inwestycji i braku wystarczającej liczby chętnych do odbioru energii. Amerykański dozór jądrowy (U.S. NRC) prowadzi obecnie ocenę i certyfikację kilkunastu (!) konstrukcji SMR-ów. Jednocześnie pojawiają się sygnały, że zasilanie z niezawodnych źródeł jądrowych budzi rosnące zainteresowanie operatorów wielkich centrów danych informatycznych – przede wszystkim trzech wiodących gigantów branży IT: *Google*, *Microsoft* i *Amazon*. Wydaje się, że SMR-y mają ogromny potencjał do zastosowań przemysłowych wymagających dużej pewności zasilania – przemysłu chemicznego,

petrochemicznego, metalurgii, a także wspomnianego już wcześniej wytwarzania wodoru jako elementu energetyki przyszłości [5] (patrz rys. 9). W tym kontekście istotne znaczenie ma rozwój reaktorów wysokotemperaturowych zdolnych dostarczyć ciepła procesowego dla procesów przemysłowych wymagających temperatur powyżej 1000°C – takich jak wytop stali czy produkcja szkła [5].

Zupełnie inna sytuacja panuje w Chińskiej Republice Ludowej. Stały wzrost zapotrzebowania na energię dla „fabryki świata” pokrywany jest w większości przez nowe moce zainstalowane w elektrowniach węglowych. W 2023 r. w Chinach uruchomiono nowe bloki węglowe o łącznej mocy ok. 50 GW (!), a więc znacznie większej niż sumaryczna moc wszystkich elektrowni ciepłych pracujących obecnie w Polsce. Jednocześnie wycofano z eksploatacji stare bloki węglowe o mocy ok. 4 GW, tak więc przyrost netto wyniósł ok. 46 GW. W 2023 roku władze Chin wydały pozwolenia na budowę nowych bloków elektrowni węglowych o łącznej mocy 114 GW (jest to o 10% więcej niż rok wcześniej). Dane powyższe wydają się być nieco bulwersujące biorąc pod uwagę oficjalne stanowisko władz w Pekinie deklarujących chęć osiągnięcia bezemisyjności i neutralności

klimatycznej kraju do 2060 r. Równolegle w Państwie Środka prowadzony jest forsowny program rozwoju energetyki jądrowej. W ostatnich 10 latach Chiny uruchomiły aż 37 nowych energetycznych bloków jądrowych, zwiększając ich łączną liczbę do 55. Chiny od lat 1990-tych zakupiły większość liczących się na świecie technologii nuklearnych, w formie gotowych obiektów i dokumentacji licencyjnej ze Stanów Zjednoczonych, Kanady, Francji i Federacji Rosyjskiej. W ostatnich latach powstały tu liczne elektrownie wykorzystujące rozwiązania wiodących typów reaktorów energetycznych: AP1000, EPR i WWER-1000 i CANDU 6. Amerykańskie reaktory AP1000 stały się wzorcem do opracowania własnych konstrukcji: CAP1000 i CAP1400. Na bazie technologii francuskich reaktorów ciśnieniowych wodnych Chińczycy opracowali projekt bloku energetycznego z reaktorem Hualong One przeznaczony na rynki eksportowe. Trwają intensywne prace nad reaktorami czwartej generacji – w tym SMR-ami i rozwiązaniami wysokotemperaturowymi.

Japonia, od dziesięcioleci uzależniona jest od importu surowców energetycznych. Energetyka jądrowa wydaje się zatem najbardziej racjonalną opcją zapewnienia zasilania systemu energetycznego tego wyspiarskiego, wysoce uprzemysłowionego i gęsto zaludnionego kraju. Pierwszy energetyczny blok jądrowy uruchomiono w Japonii już 1966 r. Po pierwszym kryzysie naftowym (1973 r.) energetyka jądrowa stała się tu kierunkiem priorytetowym. Do 2011 r. Japonia wytwarzała już około 30% energii elektrycznej w blokach jądrowych z planami osiągnięcia 40% w 2017 r. Niestety wielkie trzęsienie ziemi i uderzenie fali tsunami w dniu 11 marca 2011 r. spowodowało katastrofę w jednej z najstarszych japońskich elektrowni jądrowych Fukushima Daiichi. Praktycznie wszystkie pozostałe elektrownie jądrowe w kraju wyłączono z eksploatacji na całe miesiące i lata. W międzyczasie wprowadzono nowe przepisy, mające znacznie podwyższyć bezpieczeństwo. Część najstarszych japońskich elektrowni jądrowych zdecydowano się trwale wyłączyć i docelowo zdemontować. Nowsze bloki w ostatnich latach podlegały stopniowej modernizacji i przywracaniu do ruchu. Na skutek tych wydarzeń udział energetyki jądrowej w miksie energetycznym Japonii jest niski – w 2022 r. wynosił zaledwie 5%, a więc sześciokrotnie mniej niż przed katastrofą w Fukushima, przy ponad 30-procentowych udziałach węgla i gazu ziemnego w miksie krajowym.

Kolejnym liderem rynku jądrowego na Dalekim Wschodzie jest Republika Korei. Po udanym transferze technologii z USA, Kanady i Francji w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ub. stulecia kraj ten uzyskał praktycznie samodzielność technologiczną. Na bazie rozwiązań amerykańskiej firmy *Combustion Engineering* rozwinięte zostały koreańskie konstrukcje OPR-1000 i APR-1400 odnosząc duży sukces na rynku krajowym i eksportowym [3].

Indie, podobnie jak Chiny, wciąż wytwarzają większą część energii elektrycznej w elektrowniach węglowych (aż 74%). Pomimo wieloletnich wysiłków włożonych w rozwój krajowego atomu udział elektrowni jądrowych to zaledwie ok. 2,5% miksu energetycznego. Obecnie w Indiach działają 22 reaktory energetyczne o łącznej mocy zainstalowanej 6780 MW: 18 ciężkowodnych (PHWR) i cztery lekkowodne. Zgodnie z najnowszymi doniesieniami Indie planują zaproszenie firm prywatnych do zainwestowania około 26 miliardów dolarów w swój sektor jądrowy. Dzięki tej inwestycji rząd indyjski ma nadzieję zbudować do 2040 r. 11 GW nowych mocy wytwórczych w energetyce jądrowej,

Bliski Wschód otworzył się szeroko na energetykę jądrową wraz ze świeżo ukończoną inwestycją w Zjednoczonych Emiratach Arabskich: EJ Barakah [3]. Czwararty, ostatni blok tej elektrowni został włączony do sieci krajowej w pierwszych dniach marca 2004 r. Kolejny kraj arabski, w którym powstaje wielka elektrownia jądrowa to Egipt. Złożona docelowo z czterech bloków energetycznych Elektrownia Jądrowa El Dabaa budowana jest w prowincji Matrouh nad brzegiem Morza Śródziemnego, około 320 kilometrów na północny zachód od Kairu. Projekt bazuje na wykorzystaniu rosyjskich reaktorów ciśnieniowo-wodnych typu WWER-1200 dostarczanych przez firmę *Rosatom*. Dostawcą części turbinowej jest francuska wytwórnia koncernu *General Electric* w Belfort. Roboty budowlane przy pierwszym bloku rozpoczęły się 2022 r. Tymczasem na przeciwległym, północnym brzegu Morza Śródziemnego w Turcji powstaje bardzo podobny obiekt. Elektrownia Jądrowa Akkuyu (patrz rys. 10) również składać się będzie z czterech bloków WWER-1200. Jej budowa zaczęła się w 2018 r. i jest już obecnie poważnie zaawansowana (patrz rys. 10). Jej pierwszy blok ma szansę na uruchomienie już w 2025 r. Docelowo EJ Akkuyu pokryje 10% zapotrzebowania na energię elektryczną Turcji.

* * *

Przyjęty w Europie kurs na dekarbonizację gospodarki i będącej jej nieodłączną częścią energetyki generacyjnej, zmusza do podjęcia bolesnych decyzji o wyeliminowaniu z miksu energetycznego źródeł emisyjnych, których technologia związana jest ze spalaniem węgla lub związków węglowodorowych w powietrzu atmosferycznym. Lekcje wyniesione z wojny na Ukrainie i chęć przyspieszenia całego procesu transformacji energetycznej spowodowały otwarcie na energetykę jądrową, zepchniętą dotąd na margines. Ponownie zwrócono uwagę na jej bezemisyjność i wysoką pewność działania. W synergii ze źródłami odnawialnymi, wspartymi systemami magazynowania energii, energetyka jądrowa ma szansę zatem stać się jednym z filarów miksu energetycznego przyszłości.



Rys. 10. Pierwszy blok tureckiej elektrowni jądrowej Akkuyu w zaawansowanej fazie budowy. Elektrownia bazuje na rosyjskich reaktorach WWER, ale dostawcą turbozespołów jest francuska wytwórnia koncernu General Electric w Belfort (fot. Akkuyu NPP)

LITERATURA

- [1] Baza danych *Ember Electricity Data Explorer*; ember-climate.org (dostęp: 09.03.2024 r.).
- [2] Kroposki B., Bernstein A., King J., Ding F., *Good Grids Make Good Neighbors*. „IEEE Spectrum”, December 2020. *Sieć elektroenergetyczna jutra będzie autonomiczna* – przedruk w tłumaczeniu i opracowaniu J. Nowickiego w „Wiadomościach Elektrotechnicznych” nr 2/2021.
- [3] Nowicki J., *Blok jądrowy APR-1400 i jego aplikacja w Elektrowni Jądrowej Barakah*, „Śląskie Wiadomości Elektryczne” 2023, nr 6.
- [4] Nowicki J., *Energetyczny blok jądrowy AP1000 – geneza, konstrukcja i cechy bezpieczeństwa*, „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna” – Biuletyn Państwowej Agencji Atomistyki, nr 4/2023.
- [5] Nowicki J., *Energetyka jądrowa i wodorowa – perspektywy mariażu*, „Wiadomości Elektrotechniczne” 2024, nr 1.
- [6] Nowicki J., *Wielkoskalowe magazynowanie energii – rozdroże nowych technologii*, „Inżynier budownictwa” 2023, nr 4.
- [7] Schmitz-Kuhl M., *Zielvorgabe: Klimaneutral (Cel: Neutralność Klimatyczna)*, VDE Dialog, nr 4/2020 – przedruk w tłumaczeniu i opracowaniu J. Nowickiego w „Wiadomościach Elektrotechnicznych” nr 6/2021.
- [8] Zieliński A.S., (red.), *Elektrownie jądrowe w nowoczesnej gospodarce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2024.

Publikacja internetowa uzupełnionej wersji artykułu opublikowanej pierwotnie w numerze 2/2024 „Śląskich Wiadomości Elektrycznych” została zrealizowana na zlecenie Ministerstwa Przemysłu w ramach realizacji przez Izbę Gospodarczą Energetyki i Ochrony Środowiska szkolenia dla polskiego przemysłu pod kątem wykonywania prac dla energetyki jądrowej.