

Rola budynkowych hubów energii w transformacji systemów energetycznych

The role of building energy hubs in the transformation of energy systems

WIKTORIA POHL, JACEK KALINA

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.02.02

W artykule przedstawiono przegląd zagadnień związanych z rozwojem budynkowych hubów energii, które stanowią nową koncepcję zarządzania energią w sektorze budynków. Omówiono ich strukturę, funkcje oraz rolę w transformacji energetycznej ukierunkowanej na dekarbonizację i neutralność klimatyczną. Przedstawiono kluczowe technologie stosowane w hubach, w tym odnawialne źródła energii, systemy magazynowania, inteligentne sterowanie i integrację sektorową. Wskazano korzyści wynikające z wdrażania tego typu rozwiązań, takie jak poprawa efektywności energetycznej, zwiększenie elastyczności systemu, rozwój prosumeryzmu oraz wzmocnienie lokalnego bezpieczeństwa energetycznego. W artykule zaprezentowano także bariery i wyzwania związane z wdrażaniem hubów energii oraz przykłady ich praktycznych zastosowań w Europie. Podkreślono znaczenie cyfryzacji, sztucznej inteligencji i roli agregatorów w dalszym rozwoju tej koncepcji.

Słowa kluczowe: huby energii, transformacja energetyczna, energetyka rozproszona, prosumeryzm, zarządzanie energią

This article presents a review of the issues related to the development of building energy hubs, which represent a new concept for energy management in the building sector. Their structure, functions and role in the energy transition towards decarbonisation and climate neutrality are discussed. Key technologies used in the hubs are presented, including renewable energy sources, storage systems, smart control and sector integration. The benefits of implementing such solutions, such as improving energy efficiency, increasing system flexibility, developing prosumerism and strengthening local energy security, are identified. The article also presents barriers and challenges to the implementation of energy hubs and examples of their practical applications in Europe. The importance of digitalisation, artificial intelligence and the role of aggregators in the further development of the concept is highlighted.

Keywords: energy hubs, energy transition, distributed energy, prosumerism, energy management

Wprowadzenie

Transformacja energetyczna, w najbardziej ogólnym ujęciu, to radykalna zmiana dotychczasowych praktyk pozyskiwania, konwersji, przesyłu i wykorzystania nośników energii i surowców. Podstawowymi celami obecnej transformacji jest ograniczenie szkodliwego wpływu na środowisko, głównie w zakresie emisji gazów cieplarnianych, zmniejszenie zużycia zasobów nieodnawialnych, poprawa bezpieczeństwa dostaw energii oraz stworzenie nowych podstaw dla dalszego rozwoju gospodarki. Jej głównym wyzwaniem jest skuteczne przeprowadzenie głębokiej transformacji technologicznej, infrastrukturalnej i organizacyjnej we wszystkich sektorach gospodarek krajowych oraz transformacji społecznej. Transformacja energetyczna to proces wielowymiarowy, globalny i długookresowy.

Dekarbonizacja (tj. eliminacja w maksymalnym możliwym zakresie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery) i neutralność klimatyczna są obecnie kluczowymi czynnikami napędzającymi globalny proces transformacji. W jego wyniku na całym świecie wprowadzane są radykalne i bezprecedensowe zmiany w funkcjonujących systemach energetycznych, w tym w ciepłownictwie, a założenia w zakresie dalszego ich rozwoju mają charakter rewolucyjny. Ma to związek ze wzrostem świadomości społecznej, nowym podejściem do planowania, nowymi sposobami pozyskiwania energii, w tym z wykorzystaniem wcześniej niewykorzystanych zasobów, rozwojem technologii konwersji i akumulacji energii oraz narzędzi do modelowania i planowania. Z drugiej strony niepewność i ryzyko związane z popytem na energię, a także jej konwersją i ścieżkami dostaw są obecnie duże, a przyszły kształt systemu energetycznego nie jest w pełni przewidywalny.

W Unii Europejskiej proces transformacji energetycznej jest silnie powiązany z ramami regulacyjnymi, w tym z European Green Deal, pakietem Fit for 55, inicjatywą REPowerEU, dyrektywą o efektywności energetycznej (EED), dyrektywą o odnawialnych źródłach energii (RED III), reformą systemu EU ETS oraz dyrektywą o charakterystyce energetycznej budynków (EPBD). Regulacje te wyznaczają nie tylko cele redukcji emisji, ale również kierunki rozwoju technologii i organizacji sektora. Pomimo jednak wyraźnie zarysowanych celów, transformacja w poszczególnych sektorach napotyka szereg barier, które spowalniają proces wdrażania nowoczesnych rozwiązań. Na tym tle coraz większego znaczenia nabiera rola budynków w systemie energetycznym. Tradycyjnie postrzegane jako bierni odbiorcy energii, obecnie coraz częściej stają się one aktywnymi uczestnikami rynku energii. Dzięki zastosowaniu technologii odnawialnych (np. fotowoltaiki, pomp

ciepła, mikrokogeneracji) oraz systemów magazynowania (magazyn energii elektrycznej, zasobników ciepła i chłodu), budynki mogą pełnić funkcję prosumentów, jednocześnie konsumując, wytwarzając i oddając energię do sieci. Takie podejście umożliwia dwukierunkową wymianę energii, uczestnictwo w mechanizmach zarządzania popytem (DSM/DSR), a także świadczenie usług systemowych, takich jak elastyczność czy stabilizacja sieci w warunkach dużego udziału OZE. W rezultacie budynki nie tylko zmniejszają własne koszty energii, ale także zwiększają odporność systemu na wahania podaży i popytu.

Aktywizacja budynków jest ściśle powiązana z koncepcją hubów energii, które stanowią lokalne węzły konwersji, akumulacji i dystrybucji energii. W ich ramach budynki, wraz z lokalnymi źródłami wytwórczymi i infrastrukturą magazynową, tworzą zintegrowane systemy zdolne do optymalizacji gospodarki energetycznej w skali lokalnej. Huby umożliwiają pełniejsze wykorzystanie energii odnawialnej, minimalizację strat przesyłowych, a także rozwój lokalnych rynków energii, takich jak klastry czy spółdzielnie energetyczne. Dzięki temu budynki przestają być wyłącznie odbiorcami ciepła i energii elektrycznej, a zaczynają odgrywać rolę istotnych elementów transformacji, które wspierają integrację sektorową i umożliwiają tworzenie nowych modeli biznesowych w tym koncepcji „energia jako usługa”. Wdrożenie opisanych rozwiązań wymaga jednak dalszego rozwoju technologii magazynowania energii, inteligentnych systemów sterowania oraz lokalnych sieci dystrybucyjnych. Szczególne znaczenie w procesie transformacji będą miały pompy ciepła, biomasa i wykorzystanie ciepła odpadowego, które mogą dywersyfikować źródła energii i zmniejszać emisyjność systemów. Dodatkowo decentralizacja i rozwój lokalnych systemów opartych na odnawialnych źródłach energii zwiększą bezpieczeństwo energetyczne i odporność na wahania rynku paliw kopalnych.

Czym są budynkowe huby energii?

Budynkowe huby energii to zintegrowane systemy zarządzania energią w skali pojedynczych obiektów lub kompleksów budynkowych. Łączą one w jednym układzie procesy produkcji, magazynowania, konsumpcji i wymiany energii, co pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie lokalnych zasobów i aktywne uczestnictwo budynków w rynku energii. Huby tego typu wpisują się w koncepcję energetyki rozproszonej i stanowią ele-

ment transformacji w kierunku inteligentnych sieci (smart grid) [1,6].

Do kluczowych technologii wykorzystywanych w hubach budynkowych należą fotowoltaika, turbiny wiatrowe z pionową osią obrotu, powietrzne i gruntowe pompy ciepła, agregaty chłodnicze, jednostki kogeneracyjne, systemy magazynowania energii (baterie, zasobniki ciepła i chłodu, wodór), inteligentne systemy sterowania oraz infrastruktura do ładowania pojazdów elektrycznych [2, 3]. Dzięki integracji wielu źródeł i nośników energii możliwe jest realizowanie integracji procesów, odzysk energii odpadowej w miejscu jej powstawania, optymalne zarządzanie lokalnym bilansem energetycznym, a także świadczenie usług elastyczności dla systemu elektroenergetycznego.

W praktyce budynkowy hub energii jest połączeniem:

- infrastruktury technicznej wytwórczej i sieciowej (instalacje, magazyny energii, źródła OZE),
- systemów sterowania i monitoringu, tzw. BEMS (Building Energy Management System),
- algorytmów optymalizacji (np. AI do prognozowania zapotrzebowania i produkcji).

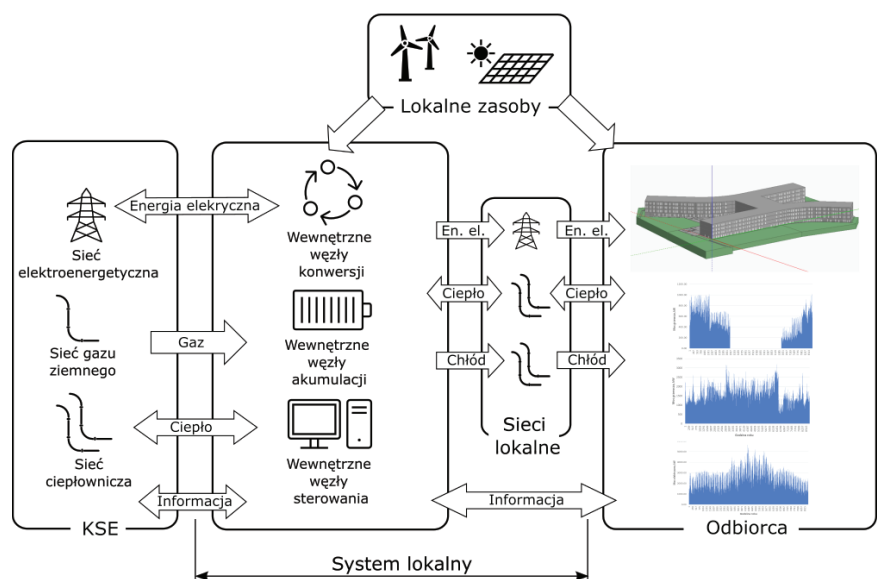
Przykładowy schemat funkcjonalny budynkowego hubu energii przedstawiono na rys. 1.

cyjny oraz emisję, a jednocześnie poprawiają odporność systemów na awarie i wahania cen energii [3, 4].

Dzięki tym cechom budynkowe huby energii stają się nie tylko rozwiązaniem technologicznym, ale także elementem nowoczesnej polityki energetycznej i miejskiej, łącząc w sobie funkcje tradycyjnych systemów zasilania i nowoczesnych platform prosumenckich [4].

Funkcje hubów energii

Koncepcja zarządzania energią i zaopatrzenia w nią odbiorców końcowych oparta na hubie energii wykracza poza znane wcześniej kogenerację czy poligenerację, które zakładały wytwarzanie wielu nośników energii tym samym procesie technologicznym w wyniku konwersji jednego lub więcej paliw. Przede wszystkim wynika to z faktu, że huby energii mogą stanowić jednocześnie źródła, jak i odbiorniki poszczególnych nośników (np. energii elektrycznej), mają zdolność magazynowania różnych nośników energii w różnych zakresach czasu, cechują się znaczną elastycznością produkcyjną oraz mają szeroki zakres funkcjonalności.



Rys. 1. Uproszczony schemat funkcjonalny budynkowego hubu energii
Fig. 1. Simplified functional diagram of a building energy hub

Budynkowe huby energii wspierają także mechanizmy DSM (Demand Side Management) i DSR (Demand Side Response), które umożliwiają aktywne reagowanie na sygnały z rynku energii. Zwiększają niezależność energetyczną użytkowników, redukują koszty eksploata-

Produkcja i konwersja

Jedną z podstawowych funkcji hubów energii jest produkcja i konwersja wielu nośników energii z wykorzystaniem lokalnie dostępnych zasobów, w szczególności odnawialnych i odpadowych.

W odróżnieniu od klasycznej kogeneracji czy poligeneracji, huby nie ograniczają się do wytwarzania energii w jednym procesie, lecz łączą różne technologie w modułowe, hybrydowe układy. Mogą one obejmować fotowoltaikę, turbiny wiatrowe, mikroturbiny gazowe, silniki tłokowe, pompy ciepła, układy ORC czy ogniwa paliwowe [1, 7, 8]. Integracja wielu nośników pozwala na elastyczne reagowanie na zmienne zapotrzebowanie odbiorców. Na przykład, w systemie budynkowym hub energii może wykorzystywać PV i pompy ciepła do zaspokojenia bieżącego zapotrzebowania, przy jednoczesnym magazynowaniu nadwyżek ciepła w zasobnikach. Z kolei w strefie przemysłowej możliwe jest połączenie turbin wiatrowych i elektrolizatorów z magazynem wodoru, co umożliwia produkcję paliw alternatywnych w ramach koncepcji Power-to-X [9, 10]. Znaczenie tej funkcji rośnie w kontekście unijnej polityki neutralności klimatycznej, zakładającej znaczący wzrost udziału źródeł OZE. Huby energii, poprzez lokalne bilansowanie wytwarzania i zużycia, pozwalają zredukować straty przesyłowe i zwiększać autokonsumpcję, co przekłada się na efektywność ekonomiczną i środowiskową [4, 12].

Magazynowanie

Kolejnym kluczowym elementem hubów energii są systemy magazynowania, umożliwiające wyrównanie bilansu podaży i popytu. Huby energii wymagają różnych rodzajów magazynów od krótkoterminowych (dobowych) po długoterminowe (sezonowe), co zapewnia im dużą elastyczność działania. W praktyce oznacza to większą niezawodność dostaw energii, możliwość odciążania sieci w godzinach szczytu i lepsze wykorzystanie nadwyżek z OZE, które charakteryzują się zmiennością [4]. W strukturach technologicznych hubów spotyka się pięć głównych kategorii magazynowania: energii elektrycznej, ciepła, chłodu, gazów oraz paliw ciekłych:

- Magazyny energii elektrycznej: baterie litowo-jonowe i technologie alternatywne (np. redox-flow), stosowane w skali lokalnej do kompensacji wahań produkcji PV i wiatru [12, 13].
- Magazyny ciepła i chłodu: zasobniki gorącej wody i wody lodowej, umożliwiające przesunięcie w czasie zapotrzebowania w budynkach i ciepłownictwie rozproszonym, technologie PCM [4, 14].
- Magazyny gazów i paliw ciekłych: zbiorniki wodoru, biometanu, amoniaku czy e-paliw, które pełnią rolę nośników pośrednich, a także elementów integracji sektorowej [15, 16].

- Vehicle-to-Grid (V2G): wykorzystanie akumulatorów samochodów elektrycznych jako źródeł elastyczności w hubach komunalnych i przemysłowych [17].

Funkcja magazynowania zwiększa odporność hubów na wahania cen energii i zdarzenia losowe, a także umożliwia świadczenie usług systemowych, np. interwencyjnego odbioru energii z systemu elektroenergetycznego o wysokim udziale OZE [18, 19].

Zarządzanie energią

Zarządzanie energią w hubach energii obejmuje szereg procesów związanych z predykcją, optymalizacją i sterowaniem. Jest to funkcja umożliwiająca dynamiczne bilansowanie wielu źródeł i odbiorców, w tym prosumentów, z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych i środowiskowych.

- DSM i DSR (Demand Side Management i Demand Side Response): angażują odbiorców w elastyczne dostosowanie poboru energii, np. poprzez przesuwanie zużycia na godziny niższych taryf lub nadpodaży OZE [19, 20];
- Dynamiczne taryfy i inteligentne systemy pomiarowe: umożliwiają bardziej precyzyjne rozliczenia i zachęcają do aktywnego uczestnictwa odbiorców a także motywują użytkowników do przesuwania zużycia na godziny, gdy energia jest tańsza i bardziej dostępna [1];
- Zaawansowane systemy sterowania: integrują wiele technologii konwersji, często działających z krótkim rocznym czasem wykorzystania mocy znamionowej, co wymaga stosowania algorytmów predykcyjnych i narzędzi optymalizacyjnych [4, 21];
- Modele biznesowe: w hubach energia staje się często usługą („energy as a service”), a kumulacja strumieni wartości (energia, ciepło, chłód, paliwa) zapewnia rentowność systemu [7, 22].

Zarządzanie energią ma kluczowe znaczenie również dla integracji hubów energii z rynkami energii: elektrycznym, paliwowym, ciepła i usług systemowych. Dzięki odpowiednim narzędziom prognozowania cen i zapotrzebowania możliwe jest tworzenie mechanizmów bilansowania opartych na lokalnych zasobach i elastyczności odbiorców [19, 23].

Integracja sektorowa

Huby energii są projektowane jako elementy umożliwiające pełną integrację sektorową, obejmującą elektroenergetykę, ciepłownictwo, chłodnictwo, transport oraz procesy

przemysłowe. Dzięki temu stają się one centralnymi węzłami lokalnych systemów energetycznych, w których zachodzą procesy Power-to-Heat, Power-to-Gas, Power-to-Liquid czy Power-to-Mobility [15, 16, 24].

- Ciepło i chłód: integracja elektroenergetyki z systemami grzewczymi poprzez pompy ciepła, kotły elektrodowe, magazyny ciepła i chłodu.
- Transport: rozwój elektromobilności i infrastruktury ładowania pojazdów w połączeniu z funkcją V2G [17].
- Przemysł: wykorzystanie energii odnawialnej do procesów elektrochemicznych, np. produkcji wodoru, amoniaku czy metanolu [4, 15].
- Gospodarka obiegu zamkniętego: rosnące znaczenie wykorzystania CO₂ i odpadów jako surowców w procesach energetycznych i przemysłowych [24].

Integracja sektorowa nie tylko zwiększa efektywność wykorzystania lokalnych zasobów, ale również umożliwia redukcję emisji w sektorach trudnych do dekarbonizacji, takich jak transport czy przemysł ciężki [4, 11].

Oprócz podstawowych funkcji produkcji, magazynowania, zarządzania i integracji, huby energii oferują szereg dodatkowych korzyści:

- Zapewnienie bezpieczeństwa dostaw i odporności systemu - huby energii stanowią zdecentralizowane węzły zwiększające niezawodność zasilania w przypadku awarii czy szoków rynkowych [19, 22].
- Obsługa prosumentów i spółdzielni energetycznych - dzięki dwukierunkowej wymianie energii huby są fundamentem lokalnych wspólnot energetycznych i klastrów [1].
- Poprawa efektywności energetycznej - poprzez optymalizację wykorzystania dostępnych zasobów i redukcję strat w przesyśle [7, 11].
- Świadczenie usług systemowych - takich jak stabilizacja napięcia, regulacja częstotliwości czy interwencyjne magazynowanie energii [4, 25].
- Wdrażanie innowacji - huby stanowią poligon doświadczalny dla nowych technologii (np. ogniwa paliwowe, Power-to-X, blockchain w energetyce) oraz modeli społecznych, w tym aktywnego udziału obywateli w rynku energii [12, 19, 26].

Przykłady wdrożeń, takie jak GreenLab Skive (Dania), Energy Lab 2.0 (Karlsruhe, Niemcy) czy inicjatywy Empa (Szwajcaria), pokazują praktyczne zastosowania hubów energii jako narzędzi demonstracyjnych i pilotażowych, które w przyszłości mogą zostać wdrożone na szeroką skalę [24, 27, 28].

Znaczenie dla transformacji systemów energetycznych

Huby energii nie tylko pełnią funkcje operacyjne, ale także mają strategiczne znaczenie dla kształtu przyszłych systemów energetycznych. Mogą odciążać sieci, wspierać prosumentów, zwiększać bezpieczeństwo energetyczne, ograniczać emisje i pełnić rolę fundamentu dla nowych modeli biznesowych w energetyce. Wysoki udział źródeł odnawialnych prowadzi do problemów bilansowych. W wielu krajach europejskich coraz częściej dochodzi do sytuacji, w których w południe podaż energii z fotowoltaiki przewyższa zapotrzebowanie, a wieczorem konieczne jest szybkie uruchamianie rezerwowych elektrowni. Huby energii przeciwdziałają temu zjawisku dzięki lokalnemu bilansowaniu. Energia wytwarzana w budynku, dzielnicy lub gminie może zostać wykorzystana na miejscu, a nadwyżki mogą trafić do magazynów lub sąsiednich odbiorców. Ogranicza to przepływy w sieci przesyłowej i redukuje straty energii. Dodatkowo huby pełnią rolę usługodawców elastyczności. Mogą pobierać energię, gdy jej podaż jest wysoka a ceny są niskie, a oddawać do sieci w momentach szczytowego zapotrzebowania [3]. W praktyce oznacza to stabilizację systemu krajowego i obniżenie kosztów utrzymania rezerw mocy.

Szczególne rolę budynkowe huby energii mogą odegrać w transformacji ciepłownictwa systemowego. Duże obiekty budynkowe mogą wspomagać realizację w sektorze ciepłownictwa założeń dyrektywy EED w zakresie spełnienia kryteriów efektywnych systemów ciepłowniczych. Mogą one w szczególności:

- wspomagać integrację odnawialnych źródeł energii przez ich wpięcie po stronie wtórnej węzłów ciepłych, a przez to zapewnić współpracę tych źródeł z siecią niskotemperaturową,
- wspomagać wyrównywanie obciążeń sieci ciepłowniczych i realizację niwelacji szczytów (ang. peak shaving),
- realizować odzysk ciepła odpadowego w miejscu jego występowania, oraz zapewnić przestrzeń do instalacji źródeł OZE (np. poprzez systemy dachowe lub gruntowe w odwiertach pod budynkami),
- wspomagać obniżenie temperatury powrotu sieci ciepłowniczych, a zatem poprawę efektywności źródeł w systemie ciepłowniczym,
- realizować wymagane działania w zakresie zmian zachowania odbiorców ciepła systemowego i wdrażania działań DSM i DSR.

Przykład budynkowego hubu energii współpracującego z miejską siecią ciepłowniczą przedstawiono w pracy [30].

Wprowadzie dyrektywa EPBD zakłada dekarbonizację sektora budynków, polegającą na wyeliminowaniu z nich spalania paliw kopalnych, kotły i układy kogeneracyjne będą mogły w nich znaleźć zastosowanie w wersji wykorzystującej biogazy, tzw. zdekarbonizowane paliwa alternatywne (np. wodór czy amoniak) lub metanol. Wprowadzie są to rozwiązania obecnie nieoptymalne, jednakże nie jest wykluczone, że mogą stanowić istotną opcję w systemie energetycznym przyszłości.

Transformacja energetyczna to nie tylko walka z emisjami, ale także odpowiedź na wyzwania związane z bezpieczeństwem dostaw energii. Kryzysy gazowe i przerwy w dostawach energii elektrycznej pokazały, że scentralizowane systemy są wrażliwe na zakłócenia. Huby energii wzmacniają odporność lokalnych społeczności. Dzięki połączeniu własnych źródeł, magazynów i inteligentnego zarządzania mogą one działać w trybie wyspowym, zapewniając zasilanie infrastruktury krytycznej szpitali, systemów wodociągowych, centrów danych czy transportu publicznego. Eladl i in. [4] zwracają uwagę, że huby energii pełnią kluczową rolę w budowaniu odporności, czyli zdolności systemu do przetrwania i adaptacji w warunkach kryzysowych. To szczególnie ważne w obliczu rosnącej częstotliwości ekstremalnych zjawisk pogodowych związanych ze zmianami klimatu. Jednym z najbardziej przełomowych aspektów transformacji energetycznej jest zmiana roli odbiorcy. Z pasywnego konsumenta staje się on aktywnym uczestnikiem rynku – prosumentem. Huby energii tworzą technologiczną i organizacyjną infrastrukturę dla tego procesu. Mogą integrować wielu prosumentów, zapewniać im wspólną przestrzeń do produkcji i magazynowania energii, a także umożliwiać lokalny handel energią w ramach klastrów i spółdzielni. Badania Orehoungi i in. [2] pokazują, że zastosowanie modelu hubu w skali dzielnicowej zwiększa samowystarczalność energetyczną i pozwala mieszkańcom współdzielić korzyści płynące z odnawialnych źródeł. To z kolei wspiera proces demokratyzacji energetyki, w którym społeczności lokalne stają się właścicielami i operatorami własnych systemów.

Cele klimatyczne UE i porozumienia paryskie wymagają drastycznej redukcji emisji gazów cieplarnianych. Huby energii mogą stać się jednym z filarów tej zmiany. Ich znaczenie wynika z faktu, że:

- pozwalają na realizację rozwiązań zdecentralizowanych, w których instalacje lokalizowane po stronie odbiorców odciążają system centralny (np. ciepłowniczy),

- pozwalają na obniżenie parametrów jakościowych źródeł (np. napięcia lub temperatury),
- zwiększają autokonsumpcję energii odnawialnej,
- redukują straty przesyłowe i emisje związane z transportem energii,
- umożliwiają wykorzystanie nadwyżek OZE poprzez technologie power-to-X,
- wspierają integrację ciepła odpadowego i lokalnych zasobów środowiskowych.

Jak podkreśla Mohammadi i in. [1] huby energii pozwalają łączyć różne sektory w ramach jednego systemu, co prowadzi do efektów synergii ograniczenia emisji i zwiększenia efektywności ogólnosystemowej.

Transformacja energetyczna to także wyzwanie przestrzenne. Wielkoskalowe farmy wiatrowe czy fotowoltaiczne wymagają znacznych terenów, co budzi konflikty społeczne i środowiskowe.

Huby energii pozwalają obejść ten problem poprzez lokalne wykorzystanie dostępnej infrastruktury:

- dachów i elewacji budynków na instalacje PV,
- terenów zurbanizowanych na mikro-turbiny czy magazyny,
- systemów ciepłowniczych na integrację pomp ciepła i kolektorów słonecznych.

Badania nad integracją energetyki rozproszonej w środowisku miejskim pokazują, że takie podejście zwiększa gęstość energetyczną i zmniejsza potrzebę ingerencji w tereny naturalne [2].

Oprócz redukcji emisji huby przyczyniają się do zwiększenia efektywności energetycznej całego systemu. Dzieje się tak dzięki:

- skróceniu drogi między produkcją a konsumpcją energii,
- ograniczeniu strat przesyłowych,
- lepszemu wykorzystaniu ciepła odpadowego,
- integracji technologii DSM i DSR, które przesuwają zużycie na okresy większej dostępności energii.

Tronchin i in. [3] podkreślają, że huby, łącząc magazynowanie, zarządzanie popytem i lokalną generację, mogą tworzyć układy o znacznie wyższej sprawności ekonomicznej i energetycznej niż tradycyjne systemy.

Huby energii mają również znaczenie systemowe i polityczne. Mogą wspierać realizację celów unijnych dotyczących neutralności klimatycznej, stymulować rozwój lokalnych gospodarek oraz zmieniać strukturę rynku energii od scentralizowanej i monopolistycznej do bardziej rozproszonej i partycypacyjnej. Huby są także narzędziem umożliwiającym wdrażanie nowych modeli biznesowych, takich jak

energia jako usługa czy lokalne rynki energii oparte na technologii blockchain [4]. Huby energii mają fundamentalne znaczenie dla transformacji systemów energetycznych. Nie tylko pełnią funkcje operacyjne produkcji, magazynowania czy zarządzania energią ale także wpływają na kształt przyszłej energetyki w wymiarze technicznym, ekonomicznym, społecznym i klimatycznym. Ich rozwój pozwala na:

- stabilizację systemów zdominowanych przez OZE,
- zwiększenie lokalnego bezpieczeństwa energetycznego,
- demokratyzację rynku poprzez wspieranie prosumentów i wspólnot,
- redukcję emisji i poprawę efektywności energetycznej,
- lepsze wykorzystanie istniejącej przestrzeni miejskiej.

W dłuższej perspektywie huby energii mogą stać się fundamentalnym budulcem nowej architektury systemów energetycznych bardziej elastycznych, odpornych i przyjaznych dla środowiska.

Bariery i wyzwania

Rozwój budynkowych hubów energii, mimo ich ogromnego potencjału w zakresie poprawy efektywności energetycznej i wspierania procesów transformacji systemów energetycznych, napotyka liczne bariery i wyzwania. Dotyczą one w szczególności czterech obszarów: regulacyjnego, technicznego, ekonomicznego oraz społecznego, a ich przezwyciężenie jest warunkiem koniecznym do pełnego wykorzystania możliwości tej koncepcji. Huby energii stanowią bowiem innowacyjne rozwiązania infrastrukturalne, integrujące różne nośniki, technologie i uczestników rynku w ramach spójnego układu wielonośnikowego. W odróżnieniu od tradycyjnych systemów energetycznych, zorganizowanych w sposób sektorowy i hierarchiczny, huby umożliwiają dwukierunkową wymianę energii, równoczesne świadczenie wielu usług oraz aktywne włączanie prosumentów w proces bilansowania lokalnej gospodarki energetycznej [1, 7, 22]. Ta wielowymiarowość zwiększa jednak stopień skomplikowania procesów projektowania, zarządzania i eksploatacji, a także stawia przed instytucjami regulacyjnymi, inwestorami i użytkownikami nowe wyzwania.

Na pierwszym planie znajdują się bariery regulacyjne. Współczesne ramy prawne i instytucjonalne są w dużej mierze dostosowane do tradycyjnych modeli funkcjonowania systemów energetycznych, które opierają się na centralnym wytwarzaniu i jednokierunkowej dystrybucji energii. Huby energii, działając na styku różnych sektorów i rynków elektroenergetyki, cie-

łownictwa, gazownictwa czy wodoru wymykają się prostym definicjom i nie mieszczą się w obowiązujących kategoriach prawnych. Brak jasnych ram dla lokalnych rynków energii, które uwzględniałyby specyfikę hubów, jest jednym z kluczowych problemów. Ustawodawstwo w wielu krajach, w tym także w Polsce, dopiero stopniowo zaczyna uwzględniać nowe formy współpracy energetycznej, jak klastry czy spółdzielnie energetyczne [29]. Nadal jednak nie określono jednoznacznie zasad rozliczania usług systemowych świadczonych przez huby, reguł integracji prosumentów czy modeli współpracy z operatorami sieci. Tego rodzaju luka regulacyjna generuje niepewność inwestycyjną, ogranicza możliwości finansowania projektów i spowalnia tempo wdrożeń. Z punktu widzenia transformacji energetycznej szczególnie ważne jest stworzenie stabilnych i przejrzystych ram prawnych dla funkcjonowania lokalnych rynków energii, które umożliwią pełne wykorzystanie elastyczności, jaką oferują budynkowe huby energii [4, 19].

Drugim kluczowym obszarem barier są kwestie techniczne. Huby energii opierają się na integracji wielu różnorodnych technologii od fotowoltaiki i turbin wiatrowych, poprzez układy kogeneracyjne i pompy ciepła, po zaawansowane systemy magazynowania energii w postaci akumulatorów, wodoru czy zasobników ciepła [7]. Brak standaryzacji i interoperacyjności systemów powoduje jednak, że łączenie ich w jedną spójną strukturę jest zadaniem skomplikowanym, czasochłonnym i kosztownym. Poszczególni producenci oferują technologie i urządzenia o odmiennych interfejsach, standardach komunikacyjnych czy wymaganiach operacyjnych, co utrudnia ich współpracę w ramach jednej platformy. Równie istotnym wyzwaniem jest integracja systemów sterowania i monitoringu. Huby, ze względu na swoją wielowymiarowość, wymagają stosowania zaawansowanych narzędzi analitycznych, w tym algorytmów predykcyjnych, technologii sztucznej inteligencji oraz systemów wieloagentowych, które pozwalają prognozować i koordynować podaż, popyt oraz ceny energii na różnych rynkach jednocześnie [1]. Dodatkowo wiele rozwiązań technologicznych, zwłaszcza związanych z sektorem wodorowym czy magazynowaniem energii, znajduje się nadal na stosunkowo niskim poziomie gotowości technologicznej, co wymaga dalszych badań, testów i demonstracji [5, 27, 28]. Brak ujednoczonych standardów i interoperacyjnych rozwiązań ogranicza skalowalność hubów i stanowi istotną barierę dla ich szerszego rozpowszechnienia.

Trzecia grupa barier ma charakter ekonomiczny. Budynkowe huby energii, choć w dłuższej perspektywie mogą przyczynić się do obniżenia kosztów zasilania i poprawy efektywności systemu, wymagają wysokich nakładów inwestycyjnych na etapie projektowania i budowy. Koszty zakupu urządzeń do konwersji energii, instalacji systemów magazynowania czy wdrożenia zaawansowanych systemów zarządzania są często nieosiągalne dla pojedynczych gospodarstw domowych czy wspólnot mieszkaniowych. W rezultacie projekty tego typu pozostają domeną dużych podmiotów przemysłowych lub instytucji badawczych. Brakuje natomiast szeroko dostępnych mechanizmów finansowania, które umożliwiłyby rozwój hubów w skali lokalnej, np. w budynkach mieszkalnych, biurowych czy użyteczności publicznej. Dodatkowo, brak wypracowanych modeli biznesowych stanowi istotną przeszkodę w komercjalizacji hubów. Obecne mechanizmy rynkowe nie w pełni uwzględniają wartość dodaną, jaką huby wnoszą poprzez świadczenie usług elastyczności, bilansowanie energii odnawialnej czy poprawę bezpieczeństwa dostaw. Koncepcje takie jak energia jako usługa (Energy-as-a-Service), kumulowanie strumieni wartości czy wspólne inwestycje prosumenckie dopiero zdobywają popularność i wymagają dopracowania pod względem prawnym, organizacyjnym i finansowym [4, 7, 19].

Ostatni obszar barier dotyczy czynników społecznych. Huby energii, szczególnie w wariantcie budynkowym, zakładają aktywne uczestnictwo użytkowników w zarządzaniu lokalną gospodarką energetyczną. Wymaga to nie tylko gotowości do inwestowania w nowe technologie, lecz także zmiany codziennych nawyków, akceptacji programów zarządzania popytem (DSM, DSR) czy współpracy w ramach struktur takich jak klastry i spółdzielnie energetyczne [4, 19]. W praktyce poziom świadomości energetycznej użytkowników jest jednak zróżnicowany, a ich gotowość do angażowania się w złożone mechanizmy współpracy ograniczona. Wiele osób postrzega inwestycję w nowe rozwiązania energetyczne przede wszystkim przez pryzmat kosztów początkowych, nie dostrzegając długofalowych korzyści. Brak wiedzy na temat funkcjonowania hubów, obawy związane z niezawodnością technologii czy nieufność wobec nowych modeli organizacyjnych mogą skutkować niskim poziomem akceptacji społecznej. Dla przezwyciężenia tych barier konieczne jest prowadzenie działań edukacyjnych i informacyjnych, a także wdrażanie mechanizmów zachęt, które zwiększałyby atrakcyjność ekonomiczną i społeczną uczestnictwa w hubach energii.

Przykłady wdrożeń i dobre praktyki

Rozwój koncepcji hubów energii, a w szczególności hubów budynkowych, znajduje swoje potwierdzenie w licznych inicjatywach realizowanych w Europie. Choć wciąż dominują projekty o charakterze demonstracyjnym i pilotażowym, ich znaczenie dla transformacji energetycznej jest fundamentalne. To właśnie one wyznaczają kierunki rozwoju, pozwalają testować nowe rozwiązania technologiczne i organizacyjne, a także stanowią praktyczne laboratoria wdrażania innowacyjnych modeli zarządzania energią [1, 11, 22]. Szczególnie istotne są doświadczenia krajów Europy Zachodniej, takich jak Niemcy, Dania, Holandia czy Szwajcaria, gdzie tworzone są zaawansowane platformy badawcze integrujące technologie odnawialne, systemy magazynowania oraz rozwiązania cyfrowe, wspierające inteligentne sterowanie i prognozowanie [4, 7].

Przykładem o dużym znaczeniu dla międzynarodowej dyskusji o hubach energii jest duński projekt GreenLab Skive, uznawany za jeden z najbardziej zaawansowanych demonstratorów w Europie. Funkcjonuje on jako żywe laboratorium, w którym testuje się różne technologie konwersji, magazynowania i wykorzystania energii. W ramach tej inicjatywy wdrażane są rozwiązania umożliwiające integrację odnawialnych źródeł energii z lokalnymi procesami przemysłowymi, co pozwala uzyskać efekt synergii pomiędzy produkcją energii, jej konsumpcją oraz możliwościami jej długoterminowego magazynowania. GreenLab Skive stał się przykładem praktycznego wykorzystania potencjału lokalnych zasobów, jednocześnie zapewniając elastyczność i odporność systemu na wahania podaży i popytu [24]. Równie ważnym przykładem europejskim jest Energy Lab 2.0 funkcjonujący na Uniwersytecie w Karlsruhe w Niemczech. Jest to obiekt demonstracyjny o dużej skali, który pozwala testować zintegrowane technologie wytwarzania, magazynowania i zarządzania energią w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Energy Lab 2.0 umożliwia m.in. symulację pracy całych systemów energetycznych, integrujących energię elektryczną, ciepło i gaz, co czyni go unikatową platformą badawczą na poziomie europejskim. Celem projektu jest nie tylko testowanie nowych rozwiązań technologicznych, ale także rozwój modeli biznesowych i regulacyjnych, które w przyszłości mogłyby znaleźć zastosowanie w pełnoskalowych wdrożeniach [27]. W Szwajcarii szczególną rolę odgrywają projekty demonstracyjne prowadzone przez instytut Empa (<https://www.empa.ch/>), które od

kilku lat wyznaczają kierunki w zakresie zintegrowanego zarządzania energią w budynkach i na poziomie lokalnych wspólnot. Obiekty Empa stanowią przykłady zastosowania zaawansowanych technologii w rzeczywistym środowisku budynkowym, gdzie analizuje się zarówno aspekty techniczne, jak i społeczne związane z funkcjonowaniem hubów energii. Projekty te koncentrują się na badaniu interakcji pomiędzy różnymi nośnikami energii, ich magazynowaniem oraz integracją z odnawialnymi źródłami, a także na roli prosumentów i aktywnych użytkowników [28]. Kolejnym interesującym przykładem jest rozwijany w Szwecji Energy Innovation Hub Malmö, który pełni funkcję centrum badawczo-rozwojowego i integruje różne podejścia do zarządzania energią w środowisku miejskim. Celem projektu jest stworzenie miejsca, w którym możliwe będzie testowanie rozwiązań sprzyjających transformacji energetycznej w warunkach dużej aglomeracji miejskiej. Malmö, jako jedno z najbardziej dynamicznie rozwijających się miast w regionie, stanowi odpowiednie środowisko dla eksperymentów w zakresie nowoczesnych technologii energetycznych [19, 22].

Warto podkreślić, że powyższe projekty nie są jedynymi przykładami aktywności w tym obszarze. Wiele innych inicjatyw znajduje się w bazie danych Międzynarodowej Agencji Energii Clean Energy Demonstration Projects Database, która gromadzi informacje o przedsięwzięciach realizowanych na całym świecie w zakresie innowacyjnych technologii energetycznych. Analiza tych danych wskazuje, że projekty dotyczące hubów energii koncentrują się głównie na testowaniu nowych technologii magazynowania, integracji sektorowej oraz rozwijaniu narzędzi cyfrowych do sterowania i prognozowania [1, 4]. W kontekście budynkowych hubów energii szczególnie ważne są również doświadczenia związane z rozwojem wspólnot energetycznych w Polsce i w Unii Europejskiej. Jak wskazuje ustawa o odnawialnych źródłach energii [29], klastry i spółdzielnie energetyczne mogą stanowić ramy organizacyjne dla funkcjonowania lokalnych hubów. Ich celem jest wspólne wytwarzanie, dystrybucja i konsumpcja energii w ramach określonego terytorium, co wpisuje się w ideę optymalizacji lokalnej gospodarki energetycznej. Przykłady z Polski pokazują, że zainteresowanie tego rodzaju inicjatywami systematycznie rośnie, choć napotykać one na bariery regulacyjne i ekonomiczne. Niemniej jednak tworzenie wspólnot energetycznych staje się dobrą praktyką, pozwalającą na aktywizację lokalnych społeczności i zwiększenie ich niezależności energetycz-

nej [4, 19]. Na uwagę zasługują także projekty pilotażowe związane z rozwojem microgridów w środowiskach uczelnianych i osiedlowych. Kampusy uniwersyteckie, ze względu na swoją specyfikę dużą koncentrację odbiorców energii, obecność laboratoriów badawczych oraz stosunkowo dużą autonomię organizacyjną stanowią idealne środowisko do testowania koncepcji hubów energii. Podobnie osiedla mieszkaniowe wyposażone w instalacje OZE i lokalne systemy magazynowania energii mogą pełnić rolę demonstratorów budynkowych hubów energii, pokazując praktyczne możliwości ich wdrożenia w warunkach codziennego życia [7, 22]. Zgromadzone doświadczenia europejskie jednoznacznie wskazują, że rozwój hubów energii wymaga silnego wsparcia w postaci projektów demonstracyjnych, które pozwalają zredukować ryzyka technologiczne i ekonomiczne, a jednocześnie tworzą bazę wiedzy dla kolejnych wdrożeń.

Perspektywy rozwoju

Rozwój hubów energii, jako struktur technologicznych i organizacyjnych o wysokim stopniu złożoności, wymaga zastosowania zaawansowanych narzędzi analitycznych i sterowniczych. Funkcjonowanie tych systemów, opierających się na wielu nośnikach energii, magazynach oraz odbiorcach końcowych, generuje ogromne ilości danych operacyjnych, których przetwarzanie w czasie rzeczywistym staje się warunkiem ich efektywnego działania [7, 22]. W tym kontekście kluczowe znaczenie mają sztuczna inteligencja (AI) oraz technologie big data, umożliwiające analizę, prognozowanie i optymalizację procesów w ramach hubów. Współczesne systemy energetyczne charakteryzują się bowiem rosnącą niepewnością po stronie podaży, wynikającą z dynamicznie zmieniającej się generacji ze źródeł odnawialnych (OZE), a także z trudnych do przewidzenia wahań popytu. Huby energii, funkcjonując jako węzły integrujące lokalne źródła energii, odbiorców, magazyny oraz sieci krajowe, stają się szczególnie podatne na tę zmienność. Z tego powodu metody tradycyjnej regulacji i planowania nie wystarczają, a ich miejsce zajmują techniki predykcyjne i algorytmy uczące się [1, 11]. Sztuczna inteligencja znajduje zastosowanie w wielu obszarach związanych z funkcjonowaniem hubów energii. Szczególnie ważne jest prognozowanie produkcji i zapotrzebowania, które dzięki wykorzystaniu modeli opartych na uczeniu maszynowym pozwala przewidywać generację energii ze źródeł rozproszonych, takich jak

fotowoltaika czy turbiny wiatrowe, a także zapotrzebowanie odbiorców w różnych horyzontach czasowych [4, 9]. Umożliwia to lepsze dopasowanie pracy hubu do zmieniających się warunków rynkowych i pogodowych. Kolejnym obszarem jest optymalizacja pracy magazynów energii. Dobór strategii ładowania i rozładowywania magazynów jest jednym z najważniejszych zagadnień w funkcjonowaniu hubu. Sztuczna inteligencja wspierana analizą big data, może podejmować decyzje w oparciu o prognozy cen energii, przewidywane obciążenia sieci oraz dostępność zasobów lokalnych [12, 16]. Ważnym polem zastosowania są również działania w ramach DSM i DSR, czyli zarządzania popytem. W hubach energii, gdzie odbiorcy mogą aktywnie uczestniczyć w bilansowaniu systemu, algorytmy sztucznej inteligencji analizują dane historyczne i bieżące, aby wskazywać optymalne strategie redukcji lub przesunięcia zapotrzebowania [7, 20]. Istotne znaczenie ma również wykorzystanie AI w zwiększaniu odporności systemu, co oznacza wspieranie działań związanych z zapewnieniem ciągłości dostaw energii w sytuacjach kryzysowych, takich jak awarie sieci czy nagłe wzrosty obciążeń. Modele predykcyjne umożliwiają wcześniejsze wykrycie zagrożeń i wdrożenie działań prewencyjnych [17, 22]. Zastosowanie AI i big data w hubach energii wpisuje się w szerszy nurt transformacji cyfrowej energetyki, w której dąży się do tworzenia systemów inteligentnych, zdolnych do autonomicznego podejmowania decyzji i adaptacji do dynamicznych zmian rynkowych. W praktyce oznacza to, że huby mogą działać nie tylko jako lokalne centra dystrybucji i magazynowania energii, ale także jako aktywni uczestnicy rynku, optymalizujący swoją pracę w oparciu o bieżące dane i przewidywania. W literaturze podkreśla się, że rozwój zaawansowanych technik modelowania, optymalizacji i prognozowania jest jednym z kluczowych warunków dalszej ewolucji hubów energii [1, 4, 19]. Można więc stwierdzić, że sztuczna inteligencja i big data stanowią fundament przyszłych rozwiązań w tym obszarze, umożliwiając pełne wykorzystanie potencjału energetyki rozproszonej oraz nowych modeli biznesowych, takich jak „energia jako usługa”.

Drugim kluczowym aspektem perspektywicznego rozwoju hubów energii jest rosnąca rola agregatorów. Agregatorzy to podmioty, które grupują odbiorców, prosumentów i źródła rozproszone, aby wspólnie uczestniczyć w rynku energii. Dzięki temu mogą oni świadczyć usługi systemowe, a także optymalizować koszty energii w skali lokalnej i regionalnej [19]. Huby energii są naturalnym środowiskiem dla

działania agregatorów, ponieważ łączą w sobie różnorodne źródła energii, magazyny oraz odbiorców. Agregator może pełnić funkcję koordynatora pracy hubu, zapewniając jednocześnie dostęp do rynków energii i usług elastyczności. W literaturze podkreśla się, że agregacja staje się niezbędnym elementem zarządzania rozproszonymi zasobami energetycznymi, zwłaszcza w kontekście rosnącego udziału OZE w miksie energetycznym [1, 19].

Potencjał agregatorów można rozpatrywać w kilku wymiarach. Z punktu widzenia ekonomicznego umożliwiają oni lepsze wykorzystanie lokalnych zasobów energii, redukują koszty transakcyjne i zwiększają konkurencyjność uczestników rynku. Dzięki efektowi skali możliwe jest uzyskanie korzystniejszych warunków zakupu i sprzedaży energii [4, 22]. W wymiarze technologicznym integracja wielu źródeł i odbiorców wymaga zaawansowanych systemów sterowania i komunikacji, a agregatorzy pełnią rolę operatorów takich systemów, zapewniając koordynację pracy w skali hubu i ponad nim [9, 13]. W wymiarze społecznym agregacja sprzyja rozwojowi spółdzielni energetycznych, klastrów i innych form współpracy lokalnej. W ten sposób mieszkańcy, przedsiębiorcy czy samorządy mogą aktywnie uczestniczyć w rynku energii, stając się prosumentami i współdecydentami w zakresie lokalnej polityki energetycznej [29, 11]. Wreszcie w wymiarze systemowym agregatorzy odgrywają istotną rolę w zapewnieniu stabilności krajowych systemów elektroenergetycznych. Dzięki możliwości zarządzania popytem i podażą w skali lokalnej, przyczyniają się do bilansowania pracy całego systemu i redukcji obciążeń sieci przesyłowych [7, 22]. Z punktu widzenia hubów energii, agregatorzy stanowią klucz do pełnego wykorzystania ich potencjału. To właśnie dzięki agregacji możliwe jest przejście od tradycyjnych modeli centralnych do systemów rozproszonych, w których energia jest produkowana, magazynowana i konsumowana w skali lokalnej. Badania wskazują, że w przyszłości agregatorzy mogą stać się operatorami lokalnych rynków energii, a huby energii infrastrukturą umożliwiającą im działanie [4, 19].

Najbardziej obiecującą perspektywą rozwoju hubów energii jest jednak możliwość tworzenia zintegrowanych ekosystemów energetycznych w miastach. Koncepcja ta zakłada budowę lokalnych systemów, w których energia jest wytwarzana, dystrybuowana, magazynowana i konsumowana w sposób skoordynowany, z uwzględnieniem potrzeb mieszkańców i możliwości lokalnych zasobów [7, 22]. Miasta, jako centra konsumpcji energii, sta-

nowią naturalne środowisko dla rozwoju hubów. Huby komunalne czy budynkowe mogą pełnić rolę lokalnych węzłów integrujących różne sektory: elektroenergetykę, ciepłownictwo, gazownictwo, a także transport. Dzięki temu możliwe staje się tworzenie systemów wielonośnikowych, w których energia elektryczna, ciepło, chłód, wodór czy biogaz funkcjonują w ramach jednej, zintegrowanej struktury [1,7]. Budowa miejskich ekosystemów energetycznych opartych na hubach przynosi szereg korzyści. Zwiększa efektywność energetyczną dzięki integracji różnych nośników energii oraz wykorzystaniu lokalnych źródeł odnawialnych, co pozwala ograniczyć straty przesyłowe i poprawić efektywność całego systemu [19, 22]. Przyczynia się do redukcji emisji poprzez zwiększenie udziału energii odnawialnej i odpadowej, co prowadzi do poprawy jakości powietrza w miastach [1, 4]. Zwiększa odporność lokalnych systemów energetycznych, ponieważ integracja wielu źródeł i magazynów energii wzmacnia bezpieczeństwo energetyczne miast w sytuacjach zakłóceń w dostawach z krajowego systemu. Huby mogą pełnić funkcję awaryjnych źródeł zasilania w sytuacjach kryzysowych [17, 22]. Tworzy wreszcie przestrzeń dla nowych modeli biznesowych, takich jak „energia jako usługa”, handel peer-to-peer czy lokalne rynki elastyczności, w których huby stanowią infrastrukturę, umożliwiając aktywny udział mieszkańców i przedsiębiorców w gospodarce energetycznej miasta [4, 19].

Przykłady wdrożeń takich koncepcji można znaleźć w projektach demonstracyjnych realizowanych w Europie, m.in. w Danii (GreenLab Skive), Niemczech (Energy Lab 2.0 w Karlsruhe) czy Szwajcarii (projekty Empa). Pokazują one, że huby energii mogą stać się fundamentem transformacji energetycznej miast, wspierając rozwój inteligentnych sieci, gospodarki wodorowej oraz gospodarki o obiegu zamkniętym [24, 27, 28]. W perspektywie długoterminowej można oczekiwać, że huby energii odegrają kluczową rolę w transformacji miejskich systemów energetycznych. Dzięki nim miasta będą mogły realizować cele zrównoważonego rozwoju, zwiększając udział energii odnawialnej, redukując emisje i zapewniając mieszkańcom stabilne dostawy energii po akceptowalnych kosztach.

Analiza perspektyw rozwoju hubów energii wskazuje zatem, że ich przyszłość nierozzerwalnie związana jest z cyfryzacją, rozwojem nowych modeli biznesowych oraz integracją w skali lokalnej. Sztuczna inteligencja i big data zapewnią narzędzia do efektywnego zarządzania złożonymi strukturami hubów, agregatorzy umożliwią

integrację i aktywizację prosumentów, a miejskie ekosystemy energetyczne staną się nowym standardem w zarządzaniu energią w ośrodkach zurbanizowanych. Wspólnie te trzy elementy wyznaczają kierunek transformacji, w której huby energii staną się kluczowym ogniwem systemów energetycznych przyszłości [1, 4, 7, 19, 22].

Podsumowanie i wnioski

Budynkowe huby energii stanowią jeden z istotnych kierunków transformacji energetycznej w kierunku neutralności klimatycznej. Ich znaczenie nie ogranicza się jedynie do aspektu technicznego, lecz obejmuje także wymiar społeczny, gospodarczy i polityczny. Budynki, dotychczas postrzegane głównie jako pasywni odbiorcy energii, coraz częściej stają się aktywnymi uczestnikami rynku, zdolnymi do wytwarzania, magazynowania i wymiany energii. Dzięki temu możliwe staje się lokalne bilansowanie podaży i popytu, większe wykorzystanie odnawialnych źródeł oraz zwiększenie odporności systemów energetycznych na wahania podaży i kryzysy związane z rynkami paliw kopalnych. Rola hubów energii wyraźnie wpisuje się w cele klimatyczne Unii Europejskiej i porozumienia paryskiego. Integracja rozproszonych źródeł odnawialnych z magazynami energii i inteligentnymi systemami zarządzania pozwala redukować emisje gazów cieplarnianych, ograniczać straty przesyłowe i wykorzystywać lokalne zasoby środowiskowe, takie jak ciepło odpadowe. Huby tworzą również warunki do wdrażania technologii umożliwiających dekarbonizację sektorów trudnych do transformacji, w tym transportu czy przemysłu ciężkiego. Ich rozwój staje się tym samym nieodzownym warunkiem budowy gospodarki niskoemisyjnej. Ważnym aspektem tej koncepcji jest jej wymiar społeczny. Huby energii wzmacniają proces demokratyzacji energetyki, angażując prosumentów, wspólnoty lokalne i samorządy w aktywne uczestnictwo w gospodarce energetycznej. Współdzielenie infrastruktury, rozwój klastrów i spółdzielni energetycznych, a także możliwość lokalnego handlu energią przyczyniają się do wzrostu niezależności społeczności oraz budowania kapitału społecznego opartego na współpracy i współodpowiedzialności. Huby stają się tym samym nie tylko narzędziem technologicznym, lecz także przestrzenią innowacji organizacyjnych i społecznych, które zwiększają akceptację dla transformacji i czynią ją bardziej otwartą. Pełne wykorzystanie potencjału hubów wymaga jednak przełamania wielu barier. Obowiązujące ramy prawne wciąż

odwołują się do tradycyjnych modeli scentralizowanej energetyki i nie odpowiadają na potrzeby lokalnych rynków opartych na dwukierunkowych przepływach energii i usługach elastyczności. Brakuje także interoperacyjnych rozwiązań technologicznych, które pozwalałyby na płynną integrację różnych systemów i urządzeń, a część technologii magazynowania i konwersji energii pozostaje na wczesnym etapie rozwoju. Istotnym problemem są również wysokie koszty inwestycyjne, które ograniczają możliwość wdrażania hubów w skali gospodarstw domowych czy wspólnot mieszkaniowych. Wreszcie, transformacja ta napotyka na bariery społeczne związane z brakiem wiedzy, niską świadomością energetyczną i obawami o niezawodność nowych technologii. Pokonanie tych przeszkód wymaga skoordynowanego wsparcia regulacyjnego, inwestycyjnego i społecznego. Potrzebne są jasne i stabilne przepisy prawne, które umożliwią funkcjonowanie lokalnych rynków energii, mechanizmy finansowe ułatwiające inwestycje w nowe technologie oraz szeroko zakrojone działania edukacyjne zwiększające świadomość i akceptację społeczną. Tylko w takich warunkach huby energii będą mogły rozwijać się na szeroką skalę i w pełni wspierać proces transformacji. Perspektywy ich rozwoju związane są z dalszą cyfryzacją i wykorzystaniem sztucznej inteligencji oraz big data, które pozwolą na precyzyjne prognozowanie produkcji i zapotrzebowania, a także optymalizację pracy magazynów i systemów zarządzania popytem. Wraz z pojawieniem się agregatorów zasobów, zdolnych do integrowania wielu prosumentów i lokalnych źródeł, huby staną się elementem większych struktur miejskich ekosystemów energetycznych. W takim modelu miasta, jako największe centra konsumpcji energii, będą mogły tworzyć własne, zintegrowane systemy wielonośnikowe, które nie tylko zwiększą efektywność, lecz także ograniczą emisje i poprawią bezpieczeństwo dostaw. Budynkowe huby energii należy więc traktować jako strategiczny element nowej architektury energetycznej. Stanowią one narzędzie umożliwiające redukcję emisji, stabilizację systemów zdominowanych przez odnawialne źródła, zwiększenie odporności lokalnych społeczności i rozwój nowych modeli biznesowych oraz społecznych. To dzięki nim możliwe będzie pogodzenie rosnącego zapotrzebowania na energię z koniecznością ochrony klimatu i środowiska. W dłuższej perspektywie huby nie będą tylko innowacją technologiczną, lecz podstawowym budulcem zdecentralizowanego, elastycznego i przyjaznego środowiska systemu energetycznego. Ich roz-

wój przesądzi o skuteczności transformacji energetycznej i realizacji neutralności klimatycznej, czyniąc je jednym z kluczowych narzędzi budowania zrównoważonej przyszłości.

Podziękowania

Publikacja została opracowana w ramach projektu DWD/6/0512/2022 „Integracja z miejskim systemem ciepłowniczym układu zasilania szpitala z lokalnym zasobnikiem ciepła technologicznego” współfinansowanego z funduszy MNiSW w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”. Niniejszym autorzy wyrażają podziękowania za dofinansowanie pracy.

Literatura

- [1] Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-Ivatloo B., Hosseinzadeh H., Yousefi H., Khorasani S. T. (2018). Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 33–50.
- [2] Orehoung K., Evins R., Dorer V. (2015). Integration of decentralized energy systems in neighbourhoods using the energy hub approach. *Applied Energy*, 154, 277–289.
- [3] Tronchin L., Manfren M., Nastasi B. (2018). Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 341–353.
- [4] Eladl A. A., El-Affifi M. I., El-Saadawi M. M., Sedhom B. E. (2023). A review on energy hubs: Models, methods, classification, applications, and future trends. *Alexandria Engineering Journal*, 68, 315–342.
- [5] Kountouris I., Langer L., Bramstoft R., Münster M., Keles D. (2023). Power-to-X in energy hubs: A Danish case study of renewable fuel production. *Energy Policy*, 175, 113439.
- [6] Geidl M., Koeppl G., Favre-Perrod P., Klöckl B., Andersson G., Fröhlich K.: *Energy Hubs For The Future. Power Systems and High Voltage Laboratories*, ETH Zurich, 8092 Zurich, Switzerland published in *IEEE Power & Energy Magazine*, 5(1):24–30, 2007
- [7] Przygodzki M.: *Modelowanie rozwoju sieci elektroenergetycznej współpracującej ze źródłami rozproszonymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2011.
- [8] Popczyk J.: *Energetyka rozproszona. Od dominacji energetyki w gospodarce do zrównoważonego rozwoju, od paliw kopalnych do energii odnawialnej i efektywności energetycznej*. Polski Klub Ekologiczny Okręg Mazowiecki. Warszawa 2011. ISBN: 978-83-915094-1-8.
- [9] Chen J., Garcia H.E.: *Economic Optimization of Operations for Hybrid Energy Systems under Variable Markets*. *Applied Energy*, Vol. 177, 2016, Pages 11–24.
- [10] Zhang G., Hu W., Cao D., Zhang Z., Huang Q., Chen Z., Blaabjerg F.: A multi-agent deep reinforcement learning approach enabled distributed energy management schedule for the coordinate control of multi-energy hub with gas, electricity, and freshwater. *Energy Conversion and Management* 255 (2022) 115340
- [11] Maroufmashtat A., S. T. Taqvi, Miragha A., Fowler M., Elkamel A. *Modeling and Optimization of Energy Hubs: A Comprehensive Review*. *Inventions* 2019, 4, 50; doi:10.3390/inventions4030050.

- [12] Khayat-zadeh J., Soleymani S., Mozafari S. B., Shourkaei H. M.: Optimizing the operation of energy storage embedded energy hub concerning the resilience index of critical load. *Journal of Energy Storage* 48 (2022) 103999.
- [13] Kebria Z. S., Fattahi P., Setak M.: Planning of Multiple Energy Hubs and Scheduling of Preventive Maintenance Equipment Under Uncertainty and Energy Storage. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*. Vol. 5, No. 1, 2020, pp. 119-136, DOI: 10.22070/JQEPO.2020.5424.1154
- [14] Chamandoust H., Derakhshan G., Mehdi Hakimi S., Bahramara S.: Multi-objectives Optimal Scheduling in Smart Energy Hub System with Electrical and Thermal Responsive Loads. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 209–232 <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0013>
- [15] Zhang G., Hu W., Cao D., Zhang Z., Huang Q., Chen Z., Blaabjerg F.: A multi-agent deep reinforcement learning approach enabled distributed energy management schedule for the coordinate control of multi-energy hub with gas, electricity, and freshwater. *Energy Conversion and Management* 255 (2022) 115340
- [16] Prabhakaran P., Graf F., Koeppl W., Kolb T.: Modelling and validation of energy systems with dynamically operated Power to Gas plants for gas-based sector coupling in de-central energy hubs. *Energy Conversion and Management* 276 (2023) 116534.
- [17] Kriechbaum L., Scheiber G., Kienberger T.: Grid-based multi-energy systems—modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges. *Energy, Sustainability and Society*, 2018, pp. 8-35 <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0176-x>
- [18] Bahmani R., Karimi H., Jadid S.: Cooperative energy management of multi-energy hub systems considering demand response programs and ice storage. *Electrical Power and Energy Systems* 130 (2021) 106904.
- [19] Maroufmashat A., S. T. Taqvi, Miragha A., Fowler M., Elkamel A. Modeling and Optimization of Energy Hubs: A Comprehensive Review. *Inventions* 2019, 4, 50; doi:10.3390/inventions4030050.
- [20] M. Rastegar, Fotuhi-Firuzabad M.: Load management in a residential energy hub with renewable distributed energy resources. *Energy and Buildings* 107 (2015) 234–242.
- [21] Salimi M., Ghasemi H., Adelpour M., Vaez-Zadeh S.: Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity. *IET Generation Transmission and Distribution*, 2015, Vol. 9, Iss. 8, pp. 695–707
- [22] Khalilpour K.R. (ed): *Polygeneration with Polystorage: For Chemical and Energy Hubs*. Academic Press, 2018, ISBN: 978-0-12-813306-4.
- [23] Orehounig K., Evins R., Dorer V.: Integration of decentralized energy systems in neighbourhoods using the energy hub approach. *Applied Energy* 154 (2015) 277–289
- [24] Kountouris I., Langer L., Bramstoft R., Münster M., Keles D.: Power-to-X in energy hubs: A Danish case study of renewable fuel production. *Energy Policy*, Volume 175, April 2023, 113439.
- [25] Mansouri S. A., Nematbakhsh E., Ahmarinejad A., Jordehi A. R., Javadi M. S., Alavi Matin S. A.: A Multi-objective dynamic framework for design of energy hub by considering energy storage system, power-to-gas technology and integrated demand response program. *Journal of Energy Storage* 50 (2022) 104206.
- [26] Mittelviehhaus M., Georges G., Boulouchos K.: Electrification of multi-energy hubs under limited electricity supply: De-/centralized investment and operation for cost-effective greenhouse gas mitigation. *Advances in Applied Energy* 5 (2022) 100083.
- [27] Karlsruhe Institute of Technology: Welcome to the Energy Lab. <https://www.elab2.kit.edu/english/index.php>
- [28] Empa Materials Science and Technology: This is ehub. <https://www.empa.ch/web/energy-hub/about>
- [29] Ustawa z dnia 17 sierpnia 2023 r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw. *Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej*, Warszawa, dnia 31 sierpnia 2023 r., Poz. 1762.
- [30] Kalina J., Pohl W.: Technical and economic analysis of a multicarrier building energy hub concept with heating loads at different temperature levels. *Energy* 288 (2024) 129882. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129882>



XVII edycja międzynarodowej konferencji z cyklu **Air, Heat and Energy**

pamięci prof. dr. inż. Gerarda Jana Beslera

Organizatorzy



Politechnika Wroclawska

Wydział Inżynierii Środowiska 

Partner wydarzenia



16–19 czerwca 2026

Artus Resort
ul. Wilcza 9

58-540 Karpacz



www.airandheat.pl



Konferencja
Air, Heat and Energy

Patronat honorowy



Patronat medialny
i czasopisma



Chłodnictwo
& Klimatyzacja

CIEPŁOWNICTWO
OGRZEWNICTWO

WENTYLACJA

INSTAL

Ri Rynek
instalacyjny

OGRZEWNICTWO | WENTYLACJA | CIEPŁOWNICTWO | KLIMATYZACJA | MIKROKLIMAT | MAGAZYN Y ENERGI I
SIECI I INSTALACJE SANITARNE I GAZOWE | EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA | JAKOŚĆ POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO