

Perspektywy rozwoju zastosowań nadprzewodnictwa w elektrotechnice i energetyce - mapa drogowa

Streszczenie. Technologia nadprzewodnikowa bazująca na materiałach charakteryzujących się unikatowymi właściwościami w zakresie przewodzenia prądu elektrycznego oraz oddziaływania w polu magnetycznym ma szansę na szeroki rozwój w zakresie aplikacji elektrotechnicznych i energetycznych. Nadprzewodnictwo, mimo że znane jest od ponad 110 lat, wymaga strategicznego i długofalowego podejścia do wdrażania tej zaawansowanej, ale też wrażliwej na warunki eksploatacyjne, technologii. Artykuł nakreśla mapę drogową rozwoju nadprzewodnictwa w obszarze elektrotechniki, opracowywaną w ramach prac Sekcji Materiałów i Technologii Elektrotechnicznych Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk.

Abstract. Superconducting technology based on materials with unique properties in the range of the transport current and interaction with a magnetic field has a chance for wide development in the field of electrical and energy applications. Superconductivity, although known for over 110 years, requires a strategic and long-term approach to the implementation of this advanced, but also sensitive to operating conditions, technology. The article summarizes a roadmap for the development of superconductivity in the field of electrical engineering, outlined as part of the work of the Section of Electrotechnical Materials and Technologies of the Electrotechnical Committee, Polish Academy of Sciences. (*Perspectives of the development of applications of superconductivity in electrical and power engineering - the road map*).

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo, mapa drogowa, aplikacje elektrotechniczne, zrównoważony rozwój.

Keywords: superconductivity, roadmap, electrotechnical application, sustainable development.

Rys historyczny

Na początku XX wieku w obszarze nauk ścisłych doszło do serii istotnych odkryć i osiągnięć naukowych. W 1908 po raz pierwszy skroplono hel, a w 1911 roku, przy okazji badań w obszarze kriogeniki odkryto zjawisko nadprzewodnictwa w rtęci [1]. Zjawisko to, mimo że ciekawe, było bardzo trudne do wykorzystania w technice ze względu na występowanie w nielicznej grupie materiałów, jedynie w ekstremalnie niskich temperaturach.

Kolejne odkrycia w obszarze nadprzewodnictwa pojawiały się względnie rzadko. Po ponad 20 latach od jego odkrycia zaobserwowana została kolejna istotna właściwość, a mianowicie idealny diamagnetyzm. Zjawisko to rozszerzyło zakres potencjalnych zastosowań nadprzewodników na zupełnie nowy obszar oddziaływań magnetycznych.

Kamieniem milowym nadprzewodnictwa było odkrycie w 1962, czyli po ponad pół wieku od zaobserwowania zjawiska, efektu tunelowego Josephsona oraz wkrótce potem bazującego na nim detektora kwantowego SQUID. Odkrycie to otworzyło szeroki obszar zastosowań nadprzewodnictwa w elektronice, technice kwantowej i metrologii [2].

Przybliżając rys historyczny nie sposób nie wspomnieć o postępach w rozwoju materiałów nadprzewodnikowych. Przez ponad 70 lat zjawisko znane było wyłącznie w niektórych metalach (głównie rtęć, ołów oraz niob), a także w stopach metali, gdzie najszerszy obszar zastosowań znalazły stopy niobu z cyną oraz z tytanem. Przełom w technologii materiałowej nastąpił w 1986 roku, kiedy to odkryte zostało nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe HTS. Dało to impuls do rozwoju elektrotechniki nadprzewodnikowej, osiąganego już w temperaturze wrzenia ciekłego azotu. Na początku XXI wieku do obszaru intensywnych badań materiałowych dołączył diborek magnezu, który mimo dość niskiej temperatury występowania nadprzewodnictwa (na poziomie 39 K), cechującą korzystne właściwości eksploatacyjne. Najnowsze badania dotyczą nadprzewodników na bazie żelaza oraz materiałów wykazujących nadprzewodnictwo pod bardzo dużym ciśnieniem (rzędu setek GPa), ale te materiały nie znalazły jeszcze zastosowań praktycznych.

Ostatnim istotnym elementem tła historycznego jest rozwój aparatu matematycznego opisującego nadprzewodnictwo. Na przestrzeni ponad 110 lat od odkrycia zjawiska pojawiały się różne podejścia do opisu nadprzewodnictwa. Jedną z pierwszych teorii dotyczących tego zjawiska była teoria przedstawiona w 1935 przez braci Londonów. Zaproponowali oni opis stanowiący uzupełnienie elektrodynamiki Maxwella. W 1950 Ginzburg i Landau przedstawili opis zjawiska nadprzewodnictwa bazujący na teorii przejść fazowych Landaua. Pierwszy makroskopowy opis zjawiska zwany od nazwisk twórców teorią BCS został sformułowany niemal pół wieku po odkryciu zjawiska. Należy jednak zaznaczyć, że wszystkie znane obecnie opisy matematyczne nadprzewodnictwa są opisami poprawnymi w określonych warunkach. Nie istnieje jedna kompleksowa teoria opisująca to zjawisko w sposób całościowy.

Intensywny rozwój techniki materiałowej oraz kriogeniki, ale także rosnące w obszarze elektrotechniki oczekiwania względem sprawności i gęstości mocy urządzeń sprawiają, że nadprzewodnictwo staje się istotnym obszarem zainteresowań inżynierskich. Powstaje jednak istotne pytanie, jakie powinny być kierunki rozwoju, zarówno w obszarze materiałów, jak i technologii elektrotechnicznych, aby wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa w tym obszarze przyniosło najlepsze rezultaty. Na to pytanie powinna dać odpowiedź zarysowana tutaj mapa drogowa rozwoju zastosowań nadprzewodnictwa w elektrotechnice.

Istota nadprzewodnictwa

Zastosowanie nadprzewodnictwa w elektrotechnice było naturalnym następstwem odkrycia materiałów wykazujących zanik oporu elektrycznego w określonych warunkach eksploatacyjnych [3]. Ta podstawowa właściwość materiałów nadprzewodnikowych, nie do końca wyjaśniona jeszcze co do istoty (istnieje kilka teorii występowania nadprzewodnictwa - jedna z podstawowych dotyczy powstawania par elektronów o przeciwnych spinach, zwanych parami Coopera, które nie podlegają zderzeniom z siecią krystaliczną), pozwala na uzyskanie niespotykanych wcześniej wartości sprawności i gęstości energii transportowanej za pośrednictwem tych materiałów. Rezystywność materiałów nadprzewodnikowych jest w

odpowiednich warunkach nawet 15 rzędów wielkości niższa od klasycznych materiałów stosowanych na przewody (miedzi czy aluminium).

Właściwości nadprzewodników nie zawsze jednak sprzyjają zastosowaniu w elektrotechnice. Jedną z takich właściwości jest gwałtowna utrata nadprzewodnictwa zwana quenchem. Pojawia się ona w przypadku przekroczenia w nadprzewodniku jednej z trzech wielkości, zwanych krytycznymi, to jest krytycznej gęstości prądu, krytycznej wartości indukcji magnetycznej lub temperatury krytycznej. Wielkości te tworzą wspólnie powierzchnię zwaną powierzchnią parametrów krytycznych. Jest ona jedna z kluczowych charakterystyk opisujących nadprzewodniki [4].

Zanik oporu elektrycznego to nie jedyna właściwość nadprzewodnictwa wykorzystywana w elektrotechnice lub szerzej w procesach inżynierskich. Drugą, niezwykle istotną właściwością nadprzewodników jest idealny diamagnetyzm. Zjawisko to związane jest z ekranowaniem określonych przestrzeni wewnątrz nadprzewodnika lub w jego sąsiedztwie poprzez prądy o dużej gęstości indukowane w nadprzewodnikach. Zjawisko to stosowane jest w układach lewitacji magnetycznej, w procesach ekranowania magnetycznego, a także w połączeniu ze zjawiskiem pułapkowania wirów pola magnetycznego na defektach struktury krystalicznej nadprzewodnika, w układach łożysk i sprężel magnetycznych.

Opisane powyżej właściwości nadprzewodników uzupełnia jeszcze jedno zjawisko o charakterze kwantowym zwane efektem Josephsona. Jest to zjawisko tunelowania par Coopera przy przejściu przez granicę nadprzewodnik-izolator. Zjawisko to znalazło zastosowanie w pomiarach bardzo niskich pól magnetycznych oraz w elektronice kwantowej.

Materiały nadprzewodnikowe dla elektrotechniki

Od chwili odkrycia nadprzewodnictwa w próbce rtęci w 1913 roku odkryto wiele materiałów wykazujących właściwości nadprzewodnikowe. W pierwszym, dość długim okresie, były to metale i stopy metali o bardzo niskich temperaturach krytycznych. W 1986 nastąpił przełom poprzez odkrycie materiałów zwanych wysokotemperaturowymi. W latach późniejszych odkryty został jeszcze diborek magnezu oraz materiały na bazie żelaza. Niestety spośród szerokiej grupy materiałów wykazujących nadprzewodnictwo, tylko kilka znalazło zastosowanie do produkcji przemysłowych (elektrotechnicznych) przewodów i taśm oraz materiałów masywnych.

Wśród materiałów niskotemperaturowych najszerszy zakres zastosowań mają dwa stopy tytanu: $NbTi$ oraz Nb_3Sn . Pierwszy z nich o temperaturze krytycznej 9,3 K oraz krytycznej indukcji magnetycznej rzędu 14 T stosowany jest głównie w układach rezonansu magnetycznego (MRI). Drugi z nich posiada dwukrotnie wyższą zarówno temperaturę krytyczną (18,3 K), jak i wartość krytyczną indukcji (rzędu 27 T). Stosowany oprócz rezonansu magnetycznego również w systemach fizyki wysokich energii (HEP) i fuzji jądrowej.

Materiały wysokotemperaturowe (HTS) znalazły znacznie szersze zastosowanie w aplikacjach elektrotechnicznych niż materiały niskotemperaturowe. W grupie materiałów HTS wyróżnia się materiały pierwszej (1G) i drugiej (2G) generacji. Opierają się na pierwiastkach ziem rzadkich (tzw. Re-BCO) - w ich skład wchodzi również stront, kobalt oraz tlenek miedzi. Materiały pierwszej generacji, obecnie coraz rzadziej stosowane, wykonane były na bazie bizmutu i produkowane w dwóch odmianach: BiSCCO-2212 oraz BiSCCO-2223 (gdzie

odpowiednie liczby odpowiadają liczbie atomów danego pierwiastka w strukturze materiału). Odmiany te różniły się zarówno temperaturą krytyczną (odpowiednio 96 K oraz 104 K) jak i anizotropią materiału pod względem wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na prąd krytyczny. Nadprzewodnik ten produkowany jest zarówno w postaci taśm, jak i przewodów w postaci cienkich filamentów (włókien) w matrycy, najczęściej srebrnej (zastosowanie srebra uniemożliwia znaczne obniżenie ceny nadprzewodnika).

Drugą grupą materiałów wysokotemperaturowych mających praktyczne zastosowanie są materiały na bazie itru (YBCO) z temperaturą krytyczną na poziomie 92 K. Materiały te produkowane są zarówno w formie przewodów (taśm), jak i nadprzewodników masywnych. Taśmy 2G produkowane są metodami elektrochemicznym (nanoszenia cienkich warstw na podłoże stabilizacyjne). Proces ten może być prowadzony w sposób zautomatyzowany, a sama taśma ze względu na małą grubość charakteryzuje się znacznie mniejszą dopuszczalną średnicą gięcia, niż taśmy 1G. Ponadto taśma może być w łatwy sposób cięta na różne szerokości oraz bardziej złożone kształty (jak na przykład taśmy do wykonania kabla Roebela). Współcześnie, trwają badania nad doskonaleniem właściwości taśm 2G.

Ostatnim materiałem, o którym warto wspomnieć przy okazji analizy mapy drogowej rozwoju tej technologii w obszarze elektrotechniki, jest diborek magnezu (MgB_2). Właściwości nadprzewodnikowe tego materiału odkryto względnie niedawno. Jego temperatura krytyczna to 39 K, ale zaletą jest prosty i tani proces produkcyjny. Materiał ten jest poddawany intensywnym badaniom i jest obiecującym kandydatem do wielu zastosowań przemysłowych [5].

Podsumowując należy podkreślić, że właściwy rozwój zastosowań nadprzewodnictwa w aplikacjach przemysłowych, jest możliwy tylko wtedy, gdy możliwe będzie wytwarzanie tanich i prostych produkcyjnie nadprzewodników o stabilnych parametrach eksploatacyjnych. Te warunki wciąż nie są jeszcze spełnione.

Kierunki rozwoju zastosowań nadprzewodnictwa

Kierunki zastosowań nadprzewodnictwa do elektrotechniki można podzielić w oparciu o proces przetwarzania energii. Aplikacje te mogą zatem obejmować wytwarzanie, dystrybucję, przetwarzanie, magazynowanie i wreszcie użytkowanie energii elektrycznej. Taki podział zostanie zastosowany w dalszej części niniejszego rozważania.

Nadprzewodnictwo w produkcji energii elektrycznej

Kluczową grupę urządzeń do wytwarzania energii elektrycznej stanowią generatory synchroniczne. Ze względu na właściwości materiałów nadprzewodnikowych ich stosowanie w obwodach prądu stałego jest znacznie bardziej korzystne, niż w układach prądu przemiennego (główną przyczyną są straty związane z przepływem prądu AC). W generatorach synchronicznych nadprzewodniki stosowane są do zastępowania uzwojenia wzbudzenia generatora. Najpowszechniejszą formą jest zastąpienie uzwojenia klasycznego (miedzianego) uzwojeniem z taśmą nadprzewodnikowej HTS. Zabieg taki pozwala na znaczne zwiększenie gęstości energii generatora oraz ograniczenie strat mocy [6]. Zastąpienie uzwojenia klasycznego nadprzewodnikowym pozwala zatem na podwyższenie gęstości mocy przypadającej na jednostkę zarówno masy, jak i objętości, a także na uzyskanie wyższej sprawności. Istniejące rozwiązania prototypowe takich maszyn wykonywane są w bardzo szerokim zakresie mocy - od

kilkuset kW do kilkudziesięciu MW, natomiast najczęstszym obszarem zastosowań jest energetyka odnawialna - generatory do hydroelektrowni oraz do turbin wiatrowych.

Drugim obszarem zastosowań nadprzewodnictwa, gdzie wytwarzana jest energia elektryczna są tokamaki plazmowe oraz stellaratory [7]. Wytwarzanie energii w dużych instalacjach tokamaków plazmowych jest technologią przyszłości. Trwają jednak wciąż intensywne prace nad rozwojem takich systemów, a największym obecnie opracowywanym jest powstający we Francji reaktor ITER. W tokamakach uzwojenia nadprzewodnikowe mają za zadanie utrzymanie plazmy w odpowiedniej pozycji poprzez wytworzenie właściwego pola magnetycznego. Działają więc jak elektromagnesy. Sterowanie położeniem plazmy oraz olbrzymia różnica temperatur pracy pomiędzy plazmą, a nadprzewodnikiem wymaga opracowania urządzenia o dużej złożoności i odporności na warunki eksploatacyjne.

Nadprzewodnictwo w dystrybucji energii

W dystrybucji energii kluczowym elementem są kable i przewody energetyczne [8]. Jak już wspomniano wcześniej technologia nadprzewodnikowa daje najlepsze rezultaty w układach prądu stałego. Stąd też kable i przewody DC wykonywane z nadprzewodnika pozwalają na niespotykane w przypadku przewodów klasycznych gęstości przesyłanej energii (nawet kilkukrotnie uwzględniając konieczność procesu chłodzenia). Zastosowanie nadprzewodników w dystrybucji energii wymaga jednak zastosowania przewodów i kabli prądu przemiennego, jedno i trójfazowych. Kable takie wykonywane są najczęściej z materiałów HTS i chłodzone ciekłym azotem [9]. W zależności od przesyłanej mocy oraz napięcia linii przesyłowej kable trójfazowe wykonuje się jako trzy oddzielne przewody (dla najwyższych napięć), jako trzy przewody we wspólnej obudowie (dla średnich napięć) lub jako trójfazowy kabel koncentryczny (dla najniższych napięć). Ograniczenie strat mocy wynikające z przepływu prądu przemiennego możliwe jest między innymi poprzez stosowanie wspomnianych już wcześniej struktur przewodów, zwanych kablem Roebela [10]. Zarówno w Stanach Zjednoczonych, jak i w Europie pracują pilotażowe linie kablowe zbudowane z nadprzewodników.

Drugim kluczowym komponentem systemu dystrybucji energii są transformatory. Podobnie jak w przypadku kabli AC, transformatory przetwarzają (wyłącznie) prąd przemienny, a zatem zastosowanie w nich materiałów nadprzewodnikowych wiąże się z powstawaniem dodatkowych strat AC. Mimo to, zamiana uzwojeń klasycznych na nadprzewodnikowe w transformatorze pozwala, podobnie jak w przypadku generatorów, na podwyższenie zarówno gęstości mocy, jak i sprawności. Nadprzewodnikowe transformatory energetyczne wykonywane są w dwóch odmianach - z zimnym (chłodzoną cieczą kriogeniczną) rdzeniem magnetycznym oraz z rdzeniem ciepłym (pozostającym w temperaturze otoczenia). W pierwszym przypadku generowane są podwyższone straty w rdzeniu magnetycznym, związane z jego ochłodzeniem. W drugim przypadku zmniejszeniu ulega współczynnik sprzężenia uzwojeń (rośnie rozproszenie) ze względu na konieczność wprowadzenia izolacji cieplnej między uzwojeniami i rdzeniem. Zakres mocy transformatorów energetycznych z uzwojeniami nadprzewodnikowymi rozciąga się między kilkudziesięcioma kVA do nawet 50 MVA [11].

Unikatowa właściwość nadprzewodników, jaką jest nagła utrata właściwości przy przekroczeniu powierzchni parametrów krytycznych dla większości zastosowań jest bardzo istotną wadą. Istnieje jednak grupa urządzeń wykorzystująca tę właściwość jako podstawę swojego

działania. Urządzeniami tymi są nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych (SFCL), występujące w bardzo wielu miejscach elektroenergetycznego systemu dystrybucji energii. Istnieje co najmniej kilka rodzajów SFCL różniących się między sobą zasadą działania. Najprostszym rozwiązaniem są ograniczniki typu rezystancyjnego. Ich działanie polega na pojawieniu się znacznej rezystancji szeregowej w obwodzie w przypadku wystąpienia prądu zwarciovego. Innym popularnym rozwiązaniem są ograniczniki indukcyjne, gdzie uzwojenie cewki ekranowane jest od rdzenia nadprzewodnikiem masywnym. W przypadku wystąpienia prądu zwarciovego nadprzewodnik traci swoje właściwości, a cewka w obecności rdzenia magnetycznego zyskuje kilkadziesiąt razy wyższą reakcję. Ograniczniki nadprzewodnikowe charakteryzują się bardzo dużą szybkością zadziałania oraz, jeżeli zapewniony zostanie odpowiedni system odprowadzania ciepła, szybkim powrotem do znamionowej pracy (a tym samym wielokrotnego zadziałania) [12], [13].

W ostatnich latach pojawiła się tendencja wykorzystywania zjawiska utraty nadprzewodnictwa, a tym samym ograniczania prądów zwarciovych bezpośrednio przez transformatory z uzwojeniami nadprzewodnikowymi [14], [15]. Zastosowanie transformatora jako ogranicznika prądu wymaga odpowiedniego doboru zarówno parametrów układu elektrycznego (rezystancji uzwojeń w stanie nadprzewodnictwa i po przejściu w stan rezystywny), jak i układu chłodzenia. Pozwala jednak na uzyskanie podwójnej funkcjonalności wykorzystując tylko jednego urządzenie.

Magazynowanie energii

Rozwój energetyki odnawialnej, a także wzrost zapotrzebowania na poprawę jakości energii jest przyczyną wzrostu zainteresowania magazynowaniem energii elektrycznej. Jedną z metod magazynowania jest magazynowanie w polu magnetycznym, gdzie energia jest proporcjonalna do indukcyjności i kwadratu prądu [16]. Nadprzewodniki okazały się doskonałym materiałem na uzwojenia cewek do magazynów indukcyjnych zwanych SMES. Wyzwaniami w tym zakresie było uzyskanie dostatecznie dużej indukcyjności, unikanie elementów mogących powodować powstawanie prądów wirowych oraz redukcja efektów brzegowych (w szeregowo połączonej cewce zwoje skrajne ograniczają prąd całej cewki). Wiele ośrodków podejmowało próby wykonania magazynu o jak największej pojemności. W przeszłości głównym materiałem na uzwojenia były taśmy, zarówno pierwszej, jak i drugiej generacji. Uzyskiwane energie nie były jednak zbyt duże (rzędu maksymalnie kilkunastu MJ). W ostatnich latach podejmowane są próby zastosowania na uzwojenia diborku magnezu, który jest materiałem wymagającym niższej temperatury, ale nie wykazuje anizotropii względem pola magnetycznego. Niezależnie od materiału uzwojeń magazyny SMES będą miały zastosowanie, jeżeli możliwe będzie uzyskanie dostatecznie dużej energii [11], [17].

Odbiorniki energii z nadprzewodnikami

Odbiornikami energii z nadprzewodnikami są najczęściej urządzenia przetwarzające energię elektryczną na inne formy energii. Istotną grupę w tym zakresie stanowią silniki elektryczne. Podobnie jak w przypadku generatorów, najlepsze właściwości uzyskiwane są dla silników synchronicznych po zamianie uzwojenia klasycznego na nadprzewodnikowe. Uzyskuje się wtedy wzrost gęstości energii i sprawności, pozwalający na konstruowanie maszyn o mniejszych gabarytach, a takiej samej jak dotychczas mocy. Takie podejście pozwala uzyskać bardzo atrakcyjne rozwiązania do zastosowań w

przemysłu transportowym, przede wszystkim na statkach i promach, ale także w statkach powietrznych (samolotach).

Wzbudzenie silnika synchronicznego może być realizowane za pomocą elektromagnesu, jakim jest uzwojenie wzbudzenia, ale również za pośrednictwem stałych źródeł pola magnetycznego. Źródłem takim, oprócz magnesów trwałych, mogą być nadprzewodniki masywne (tzw. bulk), które są zdolne do zatrzymywania pola magnetycznego w swoim wnętrzu (ang.: flux trapping). Właściwość ta wymaga odpowiedniego przygotowania nadprzewodnika masywnego i samego procesu uwięzienia w nim możliwie dużego pola magnetycznego. Zagadnienia te są na wględnie początkującym etapie i są przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych [18]. Prowadzone są też badania nad uzyskaniem w pełni nadprzewodnikowego silnika, w którym zarówno uzwojenia wzbudzenia (DC), jak i uzwojenia AC będą wykonane z nadprzewodnika [19].

Nadprzewodniki, zarówno nisko, jak i wysokotemperaturowe wykorzystywane są do wytwarzania silnych pól magnetycznych (o koncentracji i wartości pola niemożliwej do uzyskania w uzwojeniu klasycznym). Elektromagnesy stosowane są zarówno w medycynie, jak i w fizyce wysokich energii. Znane są też zastosowania w hodowli roślin oraz separacji magnetycznej.

Ekspozycja wirującego metalowego walca na silne stałe pole magnetyczne elektromagnesu skutkuje powstaniem prądów wirowych od zmiennego w przestrzeni pola magnetycznego. Zjawisko to wykorzystane zostało do opracowania metody nagrzewania indukcyjnego i obróbki cieplnej metali za pośrednictwem silnych magnesów nadprzewodnikowych [20].

Zastosowania nadprzewodników masywnych

Opisane wcześniej aplikacje wykorzystywały w większości zjawisko zaniku rezystancji (z wyjątkiem wykorzystania nadprzewodników masywnych jako źródeł pola magnetycznego). Istnieje również grupa aplikacji wykorzystujących zjawisko idealnego diamagnetyzmu (czasem wspólnie ze zjawiskiem pułapkowania wirów). Przykładem tego typu aplikacji są układy ekranowania i maskowania magnetycznego (ang.: magnetic cloaking). Rozwiązania te pozwalają na ochronę wybranych fragmentów przestrzeni przed wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. W przypadku maskowania, osłaniany obiekt nie wprowadza zmian w rozkładzie pola magnetycznego poza obszarem osłanianym [21].

Ostatnia grupa aplikacji istotnych dla rozwoju zastosowań nadprzewodnictwa w elektrotechnice to układy lewitacyjne i układy łożyskowania magnetycznego. Wykorzystując łącznie naturalne właściwości nadprzewodników, czyli diamagnetyzm i pułapkowanie wirów można zbudować stabilne układy lewitacji pasywnej. Nadprzewodniki mogą lewitować w obecności magnesów trwałych, elektromagnesów oraz w obecności innych nadprzewodników z aktywnym polem magnetycznym [22]. Zjawisko pułapkowania wirów umożliwia również budowanie różnego rodzaju łożysk magnetycznych. Ze względu na wysoki koszt produkcji nadprzewodników masywnych rozwiązania tego typu mają najczęściej charakter prototypów opracowywanych w laboratoriach badawczych. Nie ustają jednak prace nad wdrożeniem tych rozwiązań w praktyce przemysłowej.

Opisany powyżej szeroki wachlarz możliwości stosowania materiałów nadprzewodnikowych w różnego rodzaju systemach elektrotechnicznych w połączeniu z doskonałymi, niespotykanymi w przypadku innych materiałów właściwościami, czyni nadprzewodniki materiałami przyszłości, które, po pokonaniu barier technologicznych, znajdą stałe miejsce w elektrotechnice.

Stan i perspektywy badań w Polsce i na świecie

Mimo, że nadprzewodnictwo odkryte zostało ponad 100 lat temu, to wciąż nie nastąpiła istotna jego ekspansja w zastosowaniach przemysłowych. Badania związane z nadprzewodnictwem prowadzone są głównie w ośrodkach akademickich i centrach badawczych, a istniejące rozwiązania komercyjne dotyczą dość wąskiej grupy urzędów (są wśród nich np. system MRI). Mimo to, na rozwój nadprzewodnictwa przeznaczane są dość duże środki, zarówno przez instytucje rządowe, jak i dużych graczy przemysłowych (takich, jak np. Siemens).

Badania w zakresie podstaw nadprzewodnictwa prowadzone są przez liczne ośrodki badawcze w obszarze fizyki, techniki materiałowej, kriogeniki i innych podstawowych. W Polsce jednym z pierwszych ośrodków prowadzących badania w tym zakresie był Instytut Fizyki Molekularnej PAN z Poznania, w ramach którego prof. Jan Stankowski utworzył Zakład Niskich Temperatur na terenie Zakładu Odgazowania Gazu Ziarnowego w Odolanowie. Intensywne badania prowadzone są również przez Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN z Wrocławia, a także przez inne ośrodki uniwersyteckie i centra badawcze.

Na świecie powstało kilku komercyjnych producentów materiałów nadprzewodnikowych (przewodów i taśm). Są wśród nich firmy amerykańskie SuperPower i American Superconductor, japońskie Sumitomo czy niemieckie Theva i Bruker. Odrębną grupę stanowią producenci nadprzewodników masywnych, a wśród nich rozpoznawalna czeska marka CAN Superconductors. Można więc uznać, że rynek materiałów nadprzewodnikowych jest coraz bardziej stabilny, a oferta coraz szersza. W Polsce produkcją nadprzewodników zajmują się jedynie ośrodki badawcze. Najbardziej rozpoznawalnym jest Instytut Wysokich Ciśnień PAN specjalizujący się w produkcji przewodów MgB_2 [23].

Bezpośredni wpływ na rozwój elektrotechniki i energetyki mają badania w zakresie aplikacji mocy (zwane w j. ang.: large scale). Badania takie ze względu na rozmiar eksperymentów oraz interdyscyplinarny charakter badań wymagają najczęściej zaangażowania dużego nakładu środków i personelu. Stąd też badania w zakresie aplikacji dużej mocy prowadzone są w systemie konsorcjów i sieci współpracy na bazie zarówno środków międzynarodowych, w tym środków UE oraz środków krajowych.

Jako inicjatywy międzynarodowe o zasięgu globalnym rozwijane są duże instalacje dotyczące fizyki wysokich energii, czyli Wielki Zderzacz Hadronów LHC w CERN oraz wspomniany już tokamak plazmowy ITER we Francji. W rozwoju Wielkiego Zderzacza Hadronów, zarówno na etapie konstrukcji, jak i eksploatacji uczestniczą polskie ośrodki naukowe (np. Instytut Fizyki Jądrowej PAN) i polscy naukowcy - prof. Agnieszka Zalewska w latach 2013-15 była przewodniczącą Rady CERN [24].

Bardzo często swój kapitał w rozwój badań w zakresie nadprzewodnictwa wnoszą też przedsiębiorstwa uczestniczące w badaniach, a będące beneficjentem rezultatów. Poszczególne ośrodki - partnerzy przedsięwzięcia prowadzą zaś badania nad poszczególnymi komponentami wdrażanego systemu. Na takiej zasadzie realizowane są między innymi duże projekty europejskie w obszarze nadprzewodnictwa, takie jak na przykład FASTGRID (poświęcony inteligentnym sieciom energetycznym), DRYSMES4GRID (dotyczący systemów SMES [17], [25]) czy HIVOMOT poświęcony silnikom elektrycznym do aeronautyki [26]. W ostatnich latach zaangażowanie polskich zespołów w tych inicjatywach jest niewielkie.

Poza wspomnianymi dużymi projektami międzynarodowymi prowadzone są też badania w ośrodkach krajowych. W Polsce badania nad zastosowaniami nadprzewodnictwa w elektrotechnice i energetyce prowadzone są między innymi przez Politechnikę Lubelską, Politechnikę Śląską, AGH, Instytut Elektrotechniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, czy Politechnikę Łódzką. Badania prowadzone z inicjatywy prof. Tadeusza Janowskiego w zespole Politechniki Lubelskiej (wcześniej we współpracy z Instytutem Elektrotechniki), obejmowały między innymi badania ograniczników prądu, transformatorów oraz systemów magazynowania energii SMES [27]. Prowadzone badania opierały się na modelowaniu numerycznym oraz szeroko zakrojonych badaniach eksperymentalnych. Zespół Politechniki Śląskiej jako członek konsorcjum europejskiego uczestniczył pod kierunkiem prof. Bogusława Grzesika w badaniach systemu SMES oraz hydrogeneratorsa synchronicznego i transformatora nadprzewodnikowego. Obecnie prowadzone badania dotyczą pomp pola magnetycznego dla nadprzewodników masywnych oraz modelowania numerycznego generatorów i silników nadprzewodnikowych do systemów transportowych. W Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym prowadzono pod kierunkiem prof. Ryszarda Pałki badania w zakresie konstrukcji silników z magnetowodami zawierającymi komponenty nadprzewodnikowe.

Opisany powyżej zakres badań prowadzonych w Polsce potwierdza duży potencjał polskich ośrodków naukowych w zakresie badań nad zastosowaniami przemysłowymi nadprzewodnictwa. Potwierdzeniem tego jest również udział Politechniki Śląskiej i Politechniki Lubelskiej w międzynarodowej sieci współpracy Hi-SCALE (High-Temperature SuperConductivity for Accelerating the Energy Transition) w ramach inicjatywy COST (Cooperation in Science and Technology). Celem tej sieci współpracy, zrzeszającej ponad 30 ośrodków naukowych z 17 krajów, jest wzmacnianie potencjału instytucji partnerskich w zakresie rozwoju badań nad zastosowaniami nadprzewodnictwa nakierowanymi na przyspieszenie transformacji energetycznej w Europie i na świecie [28].

Badania w zakresie nadprzewodnictwa nierozdzielnie związane są z badaniami związanymi z techniką kriogeniczną. Poza ośrodkami nakierowanymi na takie badania, takimi jak Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN, prace w tym zakresie prowadzone są przez przedsiębiorstwa. Na polskim rynku techniki próżniowej i kriogenicznej istotne znaczenie odgrywa Frako-Term, zajmujące się zarówno aplikacjami nadprzewodnikowymi LTS (np. elektromagnesami), ale również techniką kriogeniczną [29]. Przedsiębiorstwem o znacznym potencjale jest również PREVAC, specjalizujący się w instalacjach wysokiej próżni [30]. Poprzez współpracę z polskimi ośrodkami naukowymi wspomniane przedsiębiorstwa wzmacniają znaczenie Polski w zakresie badań w obszarze nadprzewodnictwa.

Wyzwania i zagrożenia w rozwoju technologii

Jak już wielokrotnie wspomniano wcześniej, nadprzewodnictwo jest bardzo obiecującą i perspektywiczną technologią rozwoju aplikacji dla elektrotechniki i elektroenergetyki, przede wszystkim ze względu na niespotykane w zakresie innych technologii gęstości mocy i sprawności, a co za tym idzie bardzo pozytywny wpływ na politykę zrównoważonego rozwoju oraz proekologicznej transformacji energetycznej. Rozwój tej technologii narażony jest jednak na różnego rodzaju zagrożenia, a jej wdrożenie w praktyce przemysłowej

wymaga pokonania licznych wyzwań technologicznych, ekonomicznych i administracyjnych.

Głównymi wyzwaniami technologii nadprzewodnikowej koniecznymi do pokonania jest przede wszystkim obniżenie kosztu inwestycyjnego urządzeń. Mimo istniejącej od lat technologii produkcji nadprzewodników, cena taśm i przewodów nadprzewodnikowych wciąż utrzymuje się na bardzo wysokim poziomie. Powoduje to, że urządzenia nadprzewodnikowe są wciąż wielokrotnie droższe od urządzeń klasycznych, a zatem niekonkurencyjne komercyjnie. Kolejnym zagrożeniem, a jednocześnie wyzwaniem w zakresie technologii jest zapewnienie niezawodności urządzeń z nadprzewodnikami. Ze względu na występowanie zjawiska quenchu niezbędne jest wykonanie systemów zabezpieczeń, które zapewnią niezakłóconą pracę urządzeń, w szczególności w obszarze wrażliwych fragmentów sieci czy systemu elektroenergetycznego. Ryzyko wystąpienia zakłóceń pracy takich urządzeń jest, poza kosztem, jednym z głównych hamulców we wdrażaniu ich do praktyki przemysłowej. Kolejnym czynnikiem ryzyka ograniczającym wdrażanie urządzeń nadprzewodnikowych do przemysłu jest nieprzebadany wystarczająco czas życia urządzeń. Jak wiadomo w układach z nadprzewodnikami konieczne jest zapewnienie wydajnego systemu chłodzenia oraz utrzymanie nadprzewodnika w zakresie wyznaczonym przez powierzchnię parametrów krytycznych. Na chwilę obecną brak badań określających w sposób jednoznaczny żywotność urządzeń z nadprzewodnikami.

Rozwój badań w zakresie materiałów i technologii nadprzewodnikowych stawia przed zespołami badawczymi jeszcze inne wyzwania. Jak już wspomniano badania w wielu przypadkach dotyczą dużych instalacji przemysłowych i ich prowadzenie wymaga integracji wielu zespołów z różnych ośrodków, najczęściej międzynarodowych. Zatem wyzwaniem, w szczególności polskich zespołów badawczych, jest obecność w organizacjach i sieciach współpracy aranżujących takie zespoły. Kolejne wyzwanie związane z badaniami w obszarze nadprzewodnictwa to interdyscyplinarność badań. Ujęcie interdyscyplinarne dotyczy badań od całkiem podstawowych, takich jak produkcja taśm czy przewodów, poprzez proste systemy, aż do złożonych instalacji, gdzie przenikają się problemy elektrotechniczne, mechaniczne, termiczne i inne. Wyzwaniem jest zatem planowanie struktury zespołów badawczych zapewniających komplementarne pokrycie wszystkich tych zakresów.

Wskazane powyżej zagrożenia i wyzwania w zakresie technologii pokazują, że mimo wieloletniej obecności nadprzewodnictwa w obszarze elektrotechniki, wciąż jest bardzo wiele do zrobienia w obszarze badań, aby technologia ta mogła być obecna w aplikacjach przemysłowych. Niestabilna sytuacja polityczna jest dla nadprzewodnictwa również olbrzymim zagrożeniem, utrudniającym długofalowe planowanie badań i rozwój instalacji z nadprzewodnikami.

Podsumowanie

Przedstawiona powyżej analiza nakreśla mapę drogową rozwoju nadprzewodnictwa w obszarze elektrotechniki, opracowywaną w ramach prac Sekcji Materiałów i Technologii Elektrotechnicznych Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk.

Analiza umożliwiła nakreślenie ogólnego znaczenia nadprzewodnictwa w rozwoju elektrotechniki, w szczególności aplikacji dużej mocy. Wskazuje ona, że nadprzewodnictwo jest technologią perspektywiczną z szerokim spektrum zastosowań w całym łańcuchu przetwarzania energii, od wytwarzania, poprzez

dystrybucję, w tym magazynowanie i użytkowanie energii elektrycznej (w szczególności przetwarzanie na inne formy energii). Stan zaawansowanie badań i rozwoju zastosowań przemysłowych nadprzewodnictwa, zarówno w Polsce, jak i na świecie wciąż wymaga intensywnego rozwoju oraz zaangażowania znacznych nakładów zarówno finansowych, jak i personalnych (kadr badawczo-rozwojowych).

Rozwój badań w nadprzewodnictwie możliwy jest głównie jako praca zespołowa wielu ośrodków badawczych o charakterze międzynarodowym. Przeprowadzona analiza wskazuje, że niezbędny jest wzrost zaangażowania i udziału polskich naukowców w międzynarodowych gremiach badawczych i organizacjach zajmujących się tą tematyką.

Liczne wyzwania i ograniczenia stojące przed technologią nadprzewodnikową spowalniają i ograniczają jej obecność w aplikacjach przemysłowych. Korzystne właściwości nadprzewodnictwa, w szczególności w zakresie sprawności oraz gęstości przetwarzanej mocy pozwalają szacować, że jest to technologia, która ma szansę w niedalekiej przyszłości zastąpić rozwiązania klasyczne. Należy więc mieć nadzieję, że będzie to jeden z głównych nurtów rozwoju elektrotechniki przez co najmniej najbliższą dekadę.

Ograniczeniami obecności technologii nadprzewodnikowych w elektrotechnice, w szczególności w Polsce, mogą być problemy natury ekonomicznej oraz zawirowania polityczne wpływające na procesy finansowania nauki, wymagającej zaawansowanej aparatury naukowej i interdyscyplinarnej współpracy międzynarodowej.

Autorzy: dr hab. inż. Mariusz Stępień, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: mariusz.stepien@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Henryka D. Stryczewska, Politechnika Lubelska, Katedra Elektrotechniki i Technologii Nadprzewodnikowych, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: h.stryczewska@pollub.pl.

LITERATURA

- [1] Rogala H., Kes P. H. [red.]: 100 Years of Superconductivity. Chapt. 1. Early history, *CRC Press. Tayl. & Fr. Group*, (2011).
- [2] Maasilta I.: Superconducting electronics-are there real applications?, *ESAS Summer School on Superconductivity*, Pori, Finland, Jun. (2008).
- [3] Stankowski J., Czyżak B.: Nadprzewodnictwo, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, (1999)
- [4] Stryczewska H. D., Stępień M., Boiko O.: Plasma and Superconductivity for the Sustainable Development of Energy and the Environment, *Energies*, 15(11), 4092, Jun. (2022), doi: 10.3390/en15114092
- [5] Yetis H., et al., Transport and structural properties of MgB₂/Fe wires produced by redesigning internal Mg diffusion process, *Supercond. Sci. Technol.*, 35, 045012, 2022
- [6] Sarmiento G., Sanz S., Pujana A., Merino J. M., Marino I., Tropeano M., Nardelli D., Grasso G.: Design and Testing of Real-Scale MgB₂ Coils for SUPRAPOWER 10-MW Wind Generators, *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, V. 26, I. 3, 2016
- [7] Sanz S., Abramian P., Calero J., Fernandez A., Garcia-Tabares L., Gutierrez J. L., Lucas J., Rodriguez E., Rodriguez I., Toral F., Vazquez C.: Design of a HTS Solenoid for a Gyrotron Magnet Upgrade, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 17, Iss. 2, 2007
- [8] Kozak S., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Majka M., Czerwiński D., Łanczont M., Surdacki P.: Nadprzewodniki w urządzeniach elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 5, s. 338-345, 2013
- [9] Saugrain J-M.: High Temperature Superconducting (HTS) cables: How to speed up their development?, *1st Industry-Academia Workshop of Hi-Scale COST Action*, Gliwice, Poland, April 2021.
- [10] Goldacker W., Grilli F., Pardo E., Kario A., Schlachter S., Vojenciak M.: Roebel cables from REBCO coated conductors: a one-century-old concept for the superconductivity of the future, *Supercond. Sci. and Technology*, (2014) 27, 093001.
- [11] Tixador P. Transformers and SMES, *KIT International Summer School on Materials and Applications of Superconductivity*, Karlsruhe, Germany, July (2007).
- [12] Noe M., Hobl A., Tixador P., Martini L., Dutoit B.: Conceptual Design of a 24kV, 1kA Resistive Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, V. 22, I. 3, 2012
- [13] José Juan Pérez-Chávez J. J., Trillaud F., Castro L. M., Quéval L., Polasek A., de Andrade R. Jr: Generic Model of Three-Phase (RE)BCO Resistive Superconducting Fault Current Limiters for Transient Analysis of Power Systems, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 29, Iss. 6, 2019
- [14] Hellmann S., Abplanalp M., Hofstetter L., Noe M.: Manufacturing of a 1-MVA-Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer With Recovery-Under-Load Capabilities, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, V. 27, I. 4, 2017
- [15] Janowski T., Glowacki B. A., Wojtasiewicz G., Kozak S., Kozak J., Kondratowicz-Kucewicz B., Majka M., Wozniak M.: Fault Current Limitation in Power Network by the Superconducting Transformers Made of 2G HTS, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 21, Iss. 3, 2011
- [16] Ciceron J., Badel A., Tixador P., Forest F.: Design Considerations for High-Energy Density SMES, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 27, Iss. 4, 2017
- [17] Morandi A. Development status and preliminary test results of a cryogen-free MgB₂ SMES system. *Hi-Scale COST Action Management Meeting*, Bologna, Italy, Sept. (2021).
- [18] Krosny S., Wozniak M., Hopkins S. C., Stepien M., Grzesik B., Glowacki B. A.: Modelling of transient state phenomena of composite superconducting conductors during pulse I-c(B) measurements, *J. of Phys. Conf. Series*, (2010), 234, 022019.
- [19] Dorget R., Colle A., Ayat S., Biaujaud R., Lubin T., Lévêque J.: Superconducting machines for aircraft applications, *1st Industry-Academia Workshop of Hi-Scale COST Action*, Gliwice, Poland, April (2021)
- [20] Morandi A., Fabbri M., Ribani P. L.: Design of a Superconducting Saddle Magnet for DC Induction Heating of Aluminum Billets, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 18, Iss. 2, 2008
- [21] Solovyov M., Šouc J., Gómory F., Rikel M. O., Mikulášová E., Ušáková M., Ušák E.: Bulk and CC-Tape Based Superconducting Shields for Magnetic Cloaks, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 27, Iss. 4, 2017
- [22] Perini E., Giunchi G., Geri M., Morandi A.: Experimental and Numerical Investigation of the Levitation Force Between Bulk Permanent Magnet and MgB₂ Disk, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 19, Iss. 3, 2009
- [23] Liang H., Morawski A., Patel D., Cetner T., Billah M., Rindfleisch M., Taylor R., Yamauchi Y., Hossain S.: Superconducting joints of reacted monofilament MgB₂ wires sintered by hot uniaxial pressing system, *Superconductor Science and Technology*, 36, 125011, 2023
- [24] 30 lat Polski w CERN Instytut Fizyki Jądrowej PAN. [web page] <https://pl30cern.ifj.edu.pl/>, 2021. [Dostęp 27.10.2023]
- [25] DRYSMES4GRID Superconducting Energy Storage for Smart Electrical Grid [web page] <http://www.drysmes4grid.spin.cnr.it/>. [Dostęp 27.10.2023.]
- [26] HIVOMOT High power and VOLTage operation of electric MOTors in aeronautics [web page; dostęp 10.10.2022] <https://cordis.europa.eu/project/id/101008067>.
- [27] Janowski, T.; Stryczewska, H.D.; Wac-Włodarczyk, A. [red.]: Technologie Nadprzewodnikowe i Plazmowe w Energetyce, *Lubelskie Towarzystwo Naukowe*, (2009).
- [28] Hi-SCALE COST Action 19108 High-Temperature SuperConductivity for AcceLerating the Energy Transition [web page] <https://hi-scale.eu/>. [Dostęp 27.10.2023.]
- [29] Frako-term Strona domowa przedsiębiorstwa [web page] <https://frakoterm.pl/>. [Dostęp 27.10.2023.]
- [30] Prevac, Strona domowa przedsiębiorstwa [web page]. <https://prevac.pl/>, [Dostęp 27.10.2023.]