

Antoni CIEŚLA, Wojciech KRASZEWSKI, Mikołaj SKOWRON
 AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA, KATEDRA ELEKTROTECHNIKI

Możliwości zastosowania nadprzewodnictwa

Dr hab. inż. Antoni CIEŚLA

Urodzony 30.01.1950; związek z AGH: od 1972; dyscyplina: elektrotechnika; kierunki i specjalności: elektrotechnika, elektrotechnologie, krioelektrotechnika, nadprzewodnictwo, teoria pola elektromagnetycznego; miejsce pracy i stanowisko: AGH, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Katedra Elektrotechniki, Al. Mickiewicza 30, 30 - 059 Kraków, prof. nadzwyczajny AGH; prorektor AGH ds. Kształcenia.

e-mail: aciesla@agh.edu.pl



Mgr inż. Wojciech KRASZEWSKI

Urodzony 18.12.1980 r. ukończył studia w 2004 r. w Akademii Górniczo – Hutniczej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki na kierunku Elektrotechnika o specjalności Elektroenergetyka. Od 2004 r. jest asystentem w Katedrze Elektrotechniki. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami wpływu pola magnetycznego na organizmy żywe, oraz zastosowaniem nadprzewodników.

e-mail: wkraszew@agh.edu.pl



Mgr inż. Mikołaj SKOWRON

Urodzony 06.12.1979 r. ukończył studia w 2004 r. w Akademii Górniczo – Hutniczej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki na kierunku Elektrotechnika o specjalności Elektroenergetyka. Od 2005 r. jest asystentem w Katedrze Elektrotechniki. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami wpływu pola magnetycznego na organizmy żywe, oraz zastosowaniem nadprzewodników.

e-mail: mskowron@agh.edu.pl



jak i układów chłodzenia. Odkrycie nadprzewodnictwa w ceramikach tlenków miedzi w 1986r przez K. A. Müllera i G. Bednorza w temperaturach wyższych niż dopuszczała teoria BCS wywołało wzrost zainteresowania nadprzewodnictwem i swoisty wycięg w odkrywaniu materiałów o coraz wyższej temperaturze krytycznej, przekraczającej 100 K (rys. 1). Odkrycia te umożliwiły użycie stosunkowo taniego ciekłego azotu o temperaturze wrzenia 77 K do układów chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych [1]. Rysunek 2 przedstawia aktualne i przewidywalne przyszłe możliwości obciążenia nadprzewodników wysokotemperaturowych w aspekcie ich praktycznego wykorzystywania [2].

Streszczenie

Nadprzewodnictwo, odkryte w 1911 roku przez Kamerling Onnesa, może znaleźć liczne zastosowania. W Katedrze Elektrotechniki prowadzone są prace teoretyczne i eksperymentalne nad wykorzystaniem tego zjawiska. W niniejszym artykule zostaną one krótko zaprezentowane.

Słowa kluczowe: Materiały nadprzewodnikowe, separacja magnetyczna, elektroenergetyka, lewitacja magnetyczna.

Possibilities of using superconductivity

Abstract

Superconductivity, discovered in 1911 by Kamerling Onnes, can be use in many practical applications. In Department of Electrical Engineering, basic and applied research are been conducting for utilization this effect, what is presented in this article.

Keywords: Materials superconductors, magnetic separation, electrical power engineering, magnetic levitation.

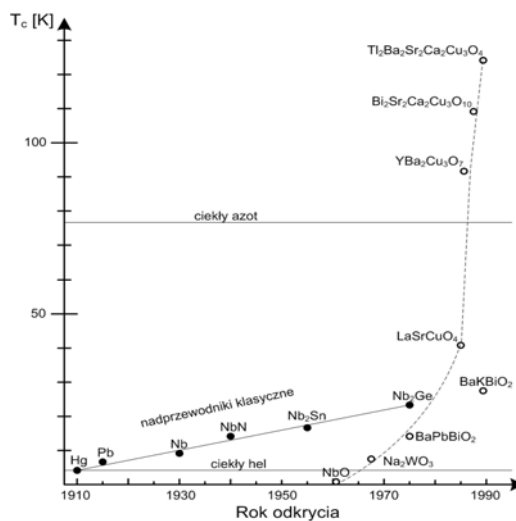
1. Wstęp

Konsekwencją postępu w technice niskich temperatur było skroplenie helu (4,2 K). Badania właściwości metali w tak niskich temperaturach doprowadziło z kolei do odkrycia zjawiska nadprzewodnictwa w 1911 roku. Mimo intensywnych badań, pierwsze zastosowania nadprzewodników w elektrotechnice zrealizowano dopiero w latach sześćdziesiątych.

Z odkryciem nadprzewodnictwa i wytworzeniem materiałów nadprzewodnikowych wiązano wielkie nadzieje na wzbudzenie silnych pól magnetycznych, bezstratny przesył energii, nadprzewodnikowe generatory i transformatory o zmniejszonych wymiarach, pociągi poruszające się na poduszce magnetycznej i wiele innych zastosowań.

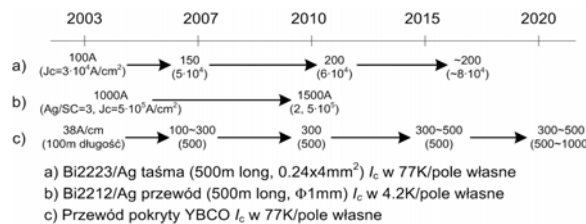
Rozwiązania techniczne z lat siedemdziesiątych nie zostały jednak zrealizowane w skali przemysłowej i komercyjnej ze względów ekonomicznych, głównie z powodu drogich układów chłodzenia wykorzystujących jako chłodziwo ciekły hel.

W ostatnim dwudziestolecu dokonano istotny postęp zarówno w technologii wytwarzania drutów i taśm nadprzewodnikowych



Rys. 1. Zmiany temperatury krytycznej od czasu odkrycia zjawiska nadprzewodnictwa

Fig. 1. The discovery of superconductivity



Rys. 2. Perspektywy rozwoju aktualnie produkowanych nadprzewodników wysokotemperaturowych (HTS) [2]

Fig. 2. Possibilities of the development of HTS

W Katedrze Elektrotechniki AGH prowadzone są prace nad wykorzystaniem zjawiska nadprzewodnictwa m.in. w procesach technologicznych, w elektroenergetyce, lewitacji magnetycznej. W niniejszym artykule zostaną one krótko zaprezentowane.

2. Materiały nadprzewodnikowe

Temperatura krytyczna to tylko jeden z trzech parametrów krytycznych, natomiast w urządzeniach nadprzewodnikowych, szczególnie silnoprądowych, bardzo istotnymi parametrami są: krytyczna gęstość prądu I_c oraz krytyczna indukcja magnetyczna B_c .

Krytyczne gęstości prądów nadprzewodnikowych wysokotemperaturowych (HTS) są o dwa rzędy mniejsze od gęstości krytycznej nadprzewodników niskotemperaturowych (LTS). Jest to podstawowe ograniczenie aplikacji energetycznych z wykorzystaniem nadprzewodników wysokotemperaturowych. Krytyczna gęstość prądu I_c nadprzewodników HTS jest funkcją temperatury i rośnie z jej obniżaniem. Podstawowe parametry techniczne nadprzewodników podano w tabeli 1, a w tabelach 2 i 3 wybrane dane techniczne produkowanych drutów i taśm nadprzewodnikowych ogólnie dostępnych.

Tab. 1. Parametry krytyczne podstawowych technicznych nadprzewodników
Tab. 1. Critical parameters of HTS

Parametr	NbTi	Nb ₃ Sn	HTS
Temp. kryt. T_c (K)	10	18	90
Ind. kryt. B_c (T)	13	27	>100
Krytyczna gęstość prądu I_c (A·mm ⁻²)	1 000	5 000	1 000

Tab. 2. Parametry wybranych przewodów LTS
Tab. 2. The main parameters of LTS

Materiały	Matryca M : Sc	Średnica przewodu [mm] Liczba włókien	Prąd krytyczny [A] w polu o indukcji ($T=4,2K$)				
			4 T	5 T	6 T	8 T	12 T
NbTi drut	Cu 2 : 1	0,5 160	150		100		
NbTi drut	Cu 2 : 1	0,5 160	230		170		
Nb ₃ Sn drut	Cu-Sn	0,76 3553		450		230	75
Nb ₃ Sn drut	Cu-Sn	3,2 67500		5000		22500	9900
NbTi taśma	Cu/Cu Ni	0,91x 15,2	4900				

Tab. 3. Parametry wybranych przewodów HTS przy $T=77K$ i $B=0$
Tab. 3. The main parameters of HTS for $T=77K$ and $B=0$

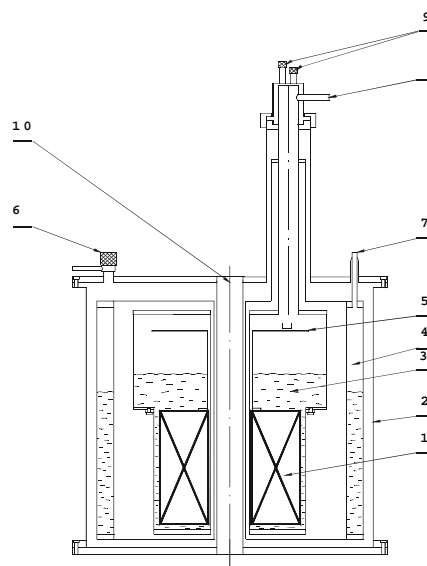
Rodzaj przewodnika	Liczba włókien	Krytyczna gęstość prądu w [A·mm ⁻²]	Producent
PIT walcowany Bi-2223 drut	wielowłokowy	440	ASC
PIT tłoczony Bi-2223 krótki drut	wielowłokowy	740	IGC
Taśma Ag/Bi-2223 PIT tłoczona	64 64	220 220	VACUMM SCHMELTZE
Taśma Ag/Bi-2223 PIT walcowana	64 64	280 310	VACUMM SCHMELTZE
Taśma BSCCO-2223	wielowłokowy	240	NST

W tabelach nie podano właściwości mechanicznych jak odporność na zginanie, stabilność cieplna, długość wytwarzanych odcinków. Są to bardzo istotne informacje podawane przez wytwórców w formie opisowej, dodatkowych tablic i wykresów, umożliwiające poprawne projektowanie konkretnych konstrukcji i technologii wytwarzania urządzeń nadprzewodnikowych [1].

3. Wybrane przykłady zastosowań nadprzewodników

3.1. Separacja magnetyczna

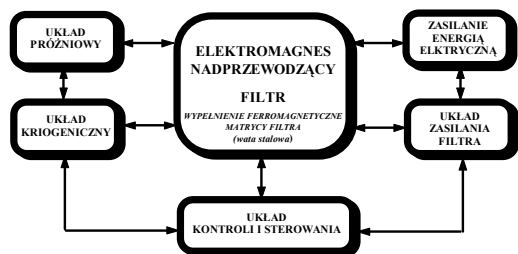
Wydzielanie cennych składników użytecznych rozproszonych w coraz uboższych surowcach mineralnych staje się podstawowym i coraz trudniejszym problemem współczesnego górnictwa. W szczególności dotyczy to przeróbki kopalin i dziedzin obejmowanych coraz częściej nazwą inżynieria mineralna. Zarówno wydzielanie cennych składników jak i usuwanie zanieczyszczeń z coraz gorszej jakości surowców mineralnych klasycznymi metodami wzbogacania staje się coraz mniej efektywne. Spowodowane jest to głównie coraz drobniejszym uziarnieniem wydzielanych składników w ubożących surowcach. Wymienione czynniki zmuszają do poszukiwania nowych technik uszlachetniania surowców. Jednym z bardzo obiecujących kierunków w technikach wzbogacania rozwijaną od kilku lat w świecie jest metoda magnetycznej separacji wysokogradientowej (High Gradient Magnetic Separation - HGMS) z wykorzystaniem elektromagnesów nadprzewodnikowych jako źródeł pola magnetycznego. Takie połączenie przeróbki kopalin i krioelektrotechniki stwarza w procesie separacji nowe możliwości wydzielania składników zawartych w surowcach, a niedostępnych zarówno dla dotychczas stosowanych technik separacji magnetycznej jak i wszelkich innych fizycznych metod rozdzielania. Jak wynika z przeglądu aktualnej literatury przedmiotu [3 – 7] separacja magnetyczna wysokogradientowa jest praktycznie jedyną metodą fizyczną, za pomocą której możliwy jest skuteczny rozdział ziaren o wielkości pojedynczych mikrometrów, a nawet mniejszych od 1µm.



Rys. 3. Schemat elektromagnesu nadprzewodnikowego będącego źródłem pola w separatorze matrycowym: 1 – uzwojenie magnes nadprzewodnikowego, 2 – kriostat, 3 – ciekły hel, 4 – naczynie azotowe, 5 – płyta przyłączeniowa, 6 – zawór próżniowy, 7 – wlew ciekłego azotu, 8 – wylot helu gazowego, 9 – króćce wylotowe ciekłego helu, 10 – kanał magnesu
Fig. 3. Construction of superconductor magnet for HGMS: 1 – winding of the superconductor magnet, 2 – cryostat, 3 – liquid helium, 4 – liquid nitrogen vessel, 5 – terminal plate, 6 – vacuum valve, 7 – filler for liquid helium, 8 – outlet for gas helium, 9 – outlet ferrules for liquid helium, 10 – canal of the magnet

Zastosowanie silnych pól magnetycznych znacznie poszerza możliwości tej metody, dzięki temu staje się ona efektywna dla rozdziału ziaren nieznacznie różniących się własnościami magnetycznymi.

W Laboratorium Krioelrotechniki Katedry Elektrotechniki AGH znajduje się elektromagnes nadprzewodnikowy (pokazany na rys. 3), który umożliwia dostęp do pola magnetycznego w temperaturze otoczenia. Może on zatem służyć jako źródło pola magnetycznego w separatorze matrycowym. Konstrukcja elektromagnesu z rysunku 3 wyposażona jest w zworę umożliwiającą zwarcie uzwojenia po uzyskaniu żądanych parametrów pola i odłączenie zasilacza prądowego oraz usunięcie krioprzepustów prądowych. Elektromagnes pracuje wówczas w stanie pracy z prądem nie znikającym, przez co znacznie ogranicza się odparowanie ciekłego helu. Jest to zatem urządzenie bardzo ekonomiczne w eksploatacji. Stanowisko elektromagnesu wyposażone jest także w niezbędną do jego eksploatacji infrastrukturę (rys. 4).



Rys. 4. Układy niezbędne do eksploatacji elektromagnesu nadprzewodnikowego

Fig. 4. Functional relations among systems co-operating with a superconductor magnet

W polu magnetycznym generowanym przez nadprzewodnikowe uzwojenie o konstrukcji osiowo - symetrycznej (solenoid) znajduje się matryca, w której zachodzi proces ekstrakcji cząstek z zawiesiny przepływającej przez separator (rys. 5). Matryca separatora jest kanistrem wypełnionym elementami gradientowórczymi w postaci wiórek lub waty ferromagnetycznej. Stanowi zatem porowaty ośrodek ferromagnetyczny znajdujący się w polu magnetycznym (rys. 5b). Widok stanowiska badawczego przedstawiony jest na rysunku 5c.

Celem prowadzonych na opisanym stanowisku badań jest opracowanie podstaw technologii przeróbki surowców i odpadów mineralnych obejmującej wydzielanie cennych składników lub groźnych zanieczyszczeń występujących bardzo często w postaci słabych magnetyków i skrajnie drobnych ziaren (nano-ziaren) rozproszonych w wytypowanych surowcach i odpadach mineralnych, a niemożliwych do wydzielenia standardowymi metodami przeróbki kopalni. Kolejnym celem jest wskazanie optymalnych zakresów w stosowaniu silnych pól magnetycznych o dużej niejednorodności do rozwiązywania konkretnych trudnych problemów w przeróbce kopalni.

Rezultatem prac powinno być określenie warunków, które należy spełnić, aby proces wydzielenia takich ziaren z badanych surowców, w warunkach stosowania silnych pól magnetycznych rzędu 4-6 T, był skuteczny i efektywny.

Celem nadrzędnym prowadzonych badań i zastosowanych metod jest doprowadzenie do lepszego wykorzystania (bardziej kompleksowego) surowców, a poprzez usunięcie zanieczyszczeń podwyższenia ich jakości oraz zmniejszenia zagrożeń środowiska związanych z powstawaniem i składowaniem różnych odpadów mineralnych.

Oprócz badań technologicznych, autorzy prowadzą prace nad stworzeniem modelu mikroskopowego separacji. Jednym z etapów tych prac jest komputerowa symulacja toru ziarna w matrycy separatora wokół jednego jej włókna pod wpływem działających na to ziarno sił. Przykłady obliczeń (kolejne fazy ruchu ziaren) pokazano na rys. 6.

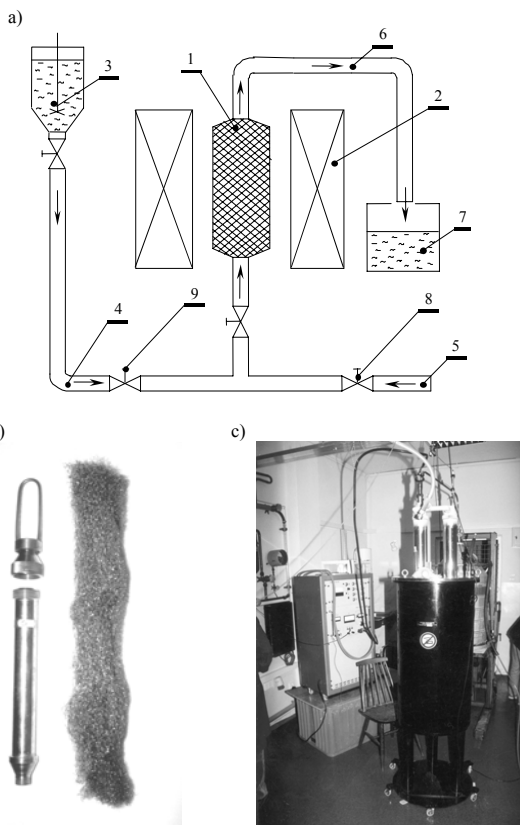
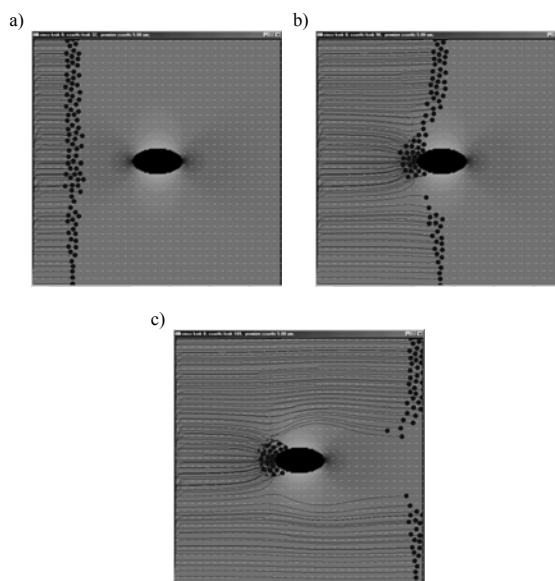


Fig. 5. Wysokogradientowy separator matrycowy z elektromagnesem nadprzewodnikowym jako źródłem pola, a) schemat urządzenia, b) matryca ferromagnetyczna filtra i jej wypełnienie nierdzewną stalową watą ferromagnetyczną, c) widok elektromagnesu nadprzewodnikowego będącego źródłem pola magnetycznego dla filtra matrycowego z rys. a). 1 - matryca filtra, 2 - uzwojenie elektromagnesu nadprzewodnikowego, 3 - zbiornik zawiesiny poddawanej filtracji, 4 - strumień zawiesiny, 5 - strumień wody czyszczącej, 6 - strumień produktu filtracji (produkt niemagnetyczny), 7 - zbiornik produktu separacji, 8, 9 - zawory

Fig. 5. Superconductor HGMS, a) scheme of superconductor separator for HGMS, b) matrix of the separator, view of superconductor magnet, 1 - matrix of the separator, 2 - winding of the superconductor magnet, 3 - container for the feed to be separated, 4 - stream of the feed, 5 - stream of rinse water, 6 - stream of the separation product, 7 - container for the separation product, 8, 9 - valve



Rys. 6. Wizualizacja ruchu ziaren paramagnetycznych wokół kolektora ferromagnetycznego (kolejne fazy ruchu: a, b, c)

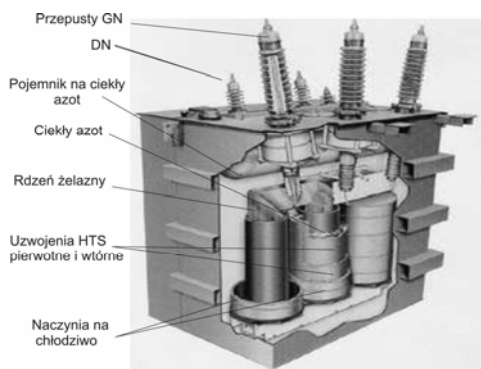
Fig. 6. Steps of particles movement in the vicinity of the collector in the matrix separator

3.2. Nadprzewodnictwo w elektroenergetyce

3.2.1. Transformatory nadprzewodnikowe

W modelach transformatorów z uzwojeniami wykonywanymi z nadprzewodników niskotemperaturowych (LTS) stosowano konstrukcje bezrdzeniowe, bowiem wysokie gęstości prądów krytycznych tych przewodników umożliwiały pracę przy wysokich indukcjach, powyżej indukcji nasycenia rdzenia ferromagnetycznego. Konstrukcja kriostatu, skomplikowana dla temperatury ciekłego helu (4,2K), może być prostsza ponieważ nie wymaga wydzielenia z kriostatu rdzenia i jego termicznego wyizolowania.

W transformatorach obecnie budowanych, stosuje się w zasadzie nadprzewodniki wysokotemperaturowe, dla których krytyczna gęstość prądu jest tylko około 5 razy wyższa od gęstości prądu w uzwojeniach miedzianych. Stosuje się tu konstrukcje rdzeniowe jednofazowe lub trójfazowe. Przy chłodzeniu ciekłym azotem tylko uzwojenia umieszczone są w kriostacie, w kąpieli azotowej natomiast rdzeń pracuje w temperaturze otoczenia (rys. 7) [1].



Rys. 7. Transformatory o uzwojeniach z nadprzewodnikowych drutów nawojowych
Fig. 7. HTS transformer

Dla ciekłego azotu kriostaty uzwojeń mają podwójne ścianki, pomiędzy którymi jest próżniowa izolacja wielowarstwowa. W latach 90-tych zbudowano wiele modeli i prototypów transformatorów nadprzewodnikowych. Najwięcej informacji opublikowano o transformatorach zbudowanych w Szwajcarii, Stanach Zjednoczonych, Japonii [8].

3.2.2. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu

Zwarcia awaryjne w sieciach elektroenergetycznych stanowią duże zagrożenie dla transformatorów, generatorów, szyn zbiorczych i linii przesyłowych oraz zmniejszają pewność dostarczania energii odbiorcom. Ograniczanie skutków zwarć znacznie wpływa na wzrost kosztów budowy i eksploatacji elementów systemu energetycznego, a więc i cenę energii elektrycznej.

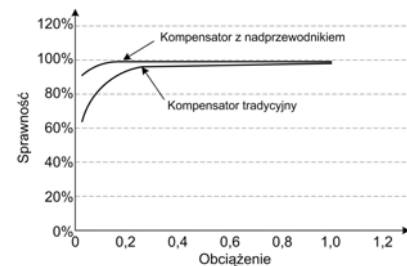
Idea budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądowych powstała ponad 25 lat temu, jednak warunki do jej realizacji powstały przed kilku laty, kiedy to wytworzono wysokotemperaturowe elementy nadprzewodnikowe oraz kontaktowe układy chłodzenia (cryoolery). W kilku laboratoriach na świecie prowadzone są intensywne badania i powstają pierwsze oferty dostawy takich urządzeń [9].

Istnieją dwa zasadnicze rodzaje rozwiązań nadprzewodnikowych ograniczników prądu: rezystancyjne i indukcyjne. Ograniczniki rezystancyjne są proste w swej konstrukcji, jednak wymagają doprowadzenia prądu roboczego do elementu nadprzewodnikowego za pomocą przepustów prądowych. W ogranicznikach indukcyjnych elementem nadprzewodnikowym jest pierścień stanowiący zwarte uzwojenie wtórne transformatora o konwencjonalnym uzwojeniu pierwotnym na prąd znamionowy sieci. W uzwojeniu generują się pewne straty mocy, ale układ taki nie wymaga przepustów prądowych i koszty chłodzenia są niewielkie [8].

3.2.3. Synchroniczne kompensatory mocy biernej

Kompensator synchroniczny jest dynamicznym kompensatorem mocy biernej zbudowanym jako wirująca maszyna, pracująca synchronicznie z siecią, o architekturze podobnej do synchronicznego silnika lub generatora.

Jej wzbudzenie jest sterowane przez regulator napięcia w celu dostarczenia lub odbierania mocy biernej z sieci. Może reagować dostatecznie szybko, aby zabezpieczyć przed chwilowymi przepięciami lub obniżeniami napięcia, które mogą być wywołane przez chwilowe odciążenia, przemijające zwarcia wywołane przez gałęzie drzew, zwierzęta itd. Przez zastosowanie wysokotemperaturowych, nadprzewodnikowych drutów nawojowych, maszyna staje się urządzeniem sprawniejszym (rys. 8), ponadto cechują ją: mniejsze straty stałe, większą moc wyjściową, mniejsze koszty i większą niezawodność niż konwencjonalne urządzenia. Straty w uzwojeniach stanowią połowę strat maszyny klasycznej.

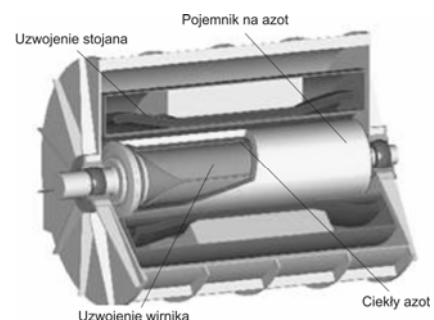


Rys. 8. Porównanie sprawności z tradycyjną maszyną przy różnych obciążeniach
Fig. 8. Efficiency comparison of HTS machine with other

Maszyna nie doświadcza naprężeń cieplnych w uzwojeniach przy zmianach obciążenia od zera do maksymalnego, co pozwala zarówno na jej „impulsową” pracę, jak i pracę ciągłą – bez zmniejszenia czasu żywotności maszyny. Kolejną zaletą jest to, że maszyny nie wprowadzają wyższych harmonicznych do sieci, zachowując jednocześnie wysoką sprawność (straty w uzwojeniach są o około 20 proc. mniejsze niż w tradycyjnych maszynach). W tradycyjnej maszynie prąd uzwojenia może osiągnąć 3-krotną wartość nominalną, co znacznie zmienia temperaturę przewodnika. W rezultacie zwoje przesuwają się, powodując mechaniczne zmęczenie izolacji. Jest to główną przyczyną awarii w tradycyjnych maszynach.

Kompensatory o uzwojeniach z nadprzewodnikowych drutów nawojowych powinny umożliwić pracę linii przesyłowych z większym obciążeniem, zredukować potrzeby instalacji nowych mocy wytwórczych i dodatkowych linii przesyłowych w rejonach o rosnącym zapotrzebowaniu na energię elektryczną. Można zastąpić stare, nieekologiczne generatory, które muszą pracować ze względu na bezpieczeństwo systemu i regulację napięcia.

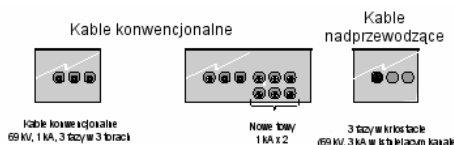
Rysunek 9 przedstawia jedno z możliwych rozwiązań konstrukcyjnych kompensatora [10].



Rys. 9. Kompensator „SuperVAR” z nadprzewodnikowym uzwojeniem wirnika i tradycyjnym statorem
Fig. 9. HTS motor power (SuperVAR)

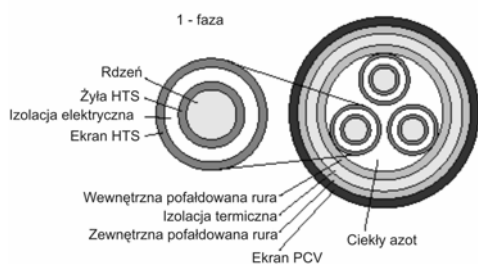
3.2.4. Kable elektroenergetyczne

Wydaje się, że kable, w których zastosowanie znajdują materiały nadprzewodnikowe mogą stanowić jedno z ważnych potencjalnych rozwiązań problemu przesyłu wielkiej mocy przy pomocy klasycznych kabli elektroenergetycznych pracujących w aglomeracjach wielkomiejskich. Podstawową cechą takich rozwiązań jest ich zwartość budowy, oraz możliwość ułożenia kabli w istniejących już podziemnych kanałach (strukturach) (rys. 10).



Rys. 10. Kompaktowość kabli z żył wykonaną z nadprzewodnika
Fig. 10. Comparison between conventional cable and superconducting cable

Konstrukcję kabla z żyłami wykonanymi z nadprzewodnika przedstawia rys. 11 [11]. Żyłka kabla zbudowana jest z nadprzewodnika, który ułożony jest na rdzeniu (matrycy). Jako izolacji elektrycznej używa się propylenowego papieru wielowarstwowego (PPLP), ponieważ w temperaturze azotowej charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami izolacyjnymi i niskim współczynnikiem strat dielektrycznych. Na zewnątrz warstwy izolacyjnej są druty z nadprzewodnika również ukształtowane w spirale tworząc ekran ochronny. Ekran każdej z faz są zwarte na obu końcach kabla co kompensuje prądy w nich wyidukowane oraz zmniejsza przenikanie pola elektromagnetycznego na zewnątrz kabla. Trzy fazy linii kablowej są ułożone razem i umieszczone w podwójnych pofalowanych kanałkach. Izolacja termiczna jest między wewnętrzną a zewnętrzną warstwą kanałków, gdzie jest utrzymywany stan próżni w celu poprawienia właściwości termicznych całego układu.



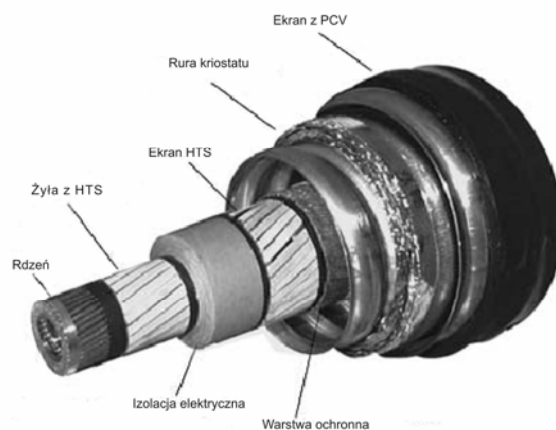
Rys. 11. Struktura kabla trójrdzeniowego o żyłach z materiału nadprzewodzącego
Fig. 11. Structure of superconducting cable (3 core)

Inne rozwiązanie konstrukcyjne kabla nadprzewodnikowego pokazano na rys. 12 [12].

Efektywna gęstość prądu, którym można obciążyć żyłkę kabla nadprzewodnikowego wynosi ok. 100 A/mm². Jest to blisko 100 razy więcej niż dla kabli konwencjonalnych (z żyłką miedzianą). Zastosowanie w procesie technologicznym produkcji nadprzewodników spiekania w podwyższonym ciśnieniu umożliwiło wytwarzanie przewodów o znacznie dłuższej i bardzo dobrych parametrach, w tym także mechanicznych (np. prąd krytyczny taśmy z nadprzewodnika o wymiarach 4mm x 0,2mm przewyższa 130 A, dodatkowo ma bardzo dużą wytrzymałość naciągu 140 MPa).

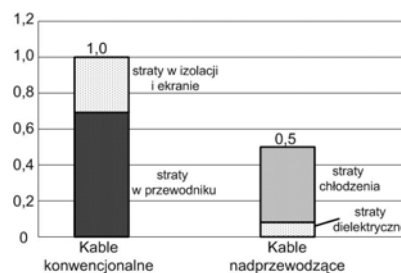
Jedną z cech charakteryzujących kable z materiału nadprzewodzącego jest zerowy opór poniżej temperatury krytycznej, tak więc współczynnik tłumienia transmisji jest bardzo mały.

Kable elektroenergetyczne posiadają ekran z nadprzewodnika skutecznie izolujący pole elektroenergetyczne, eliminuje on też prądy wirowe wywołane przez pole elektromagnetyczne.



Rys. 12. Struktura kabla jednorrdzeniowego o żyłach z materiału nadprzewodzącego
Fig. 12. Structure of superconducting cable (1 core)

Na rys. 13 dokonano porównania strat energii między kablami konwencjonalnymi a kablami o żyłach z materiału nadprzewodzącego [13].



Rys. 13. Porównanie strat między kablami konwencjonalnymi a kablami o żyłach z materiału nadprzewodzącego
Fig. 13. Example of transmission loss

Istnieją już praktyczne rozwiązania zastosowania kabli elektroenergetycznych, które pracują i zasilają odbiorców a także odbywają się na nich badania. Istnieją również projekty kabli, które w niedalekiej przyszłości rozpoczną pracę. Poniżej przedstawiono lokalizacje i specyfikacje niektórych kabli [8]:

- Carrollton, Georgia: kabel o długości 30 m, prąd pracy 1250 A, napięcie pracy 12,4 kV, pierwszy kabel demonstracyjny który pracował >26 000 h;
- Kopenhaga: kabel o długości 30 m, prąd pracy 2000 A, napięcie pracy 30 kV, pierwszy kabel który służy do zasilania 50 000 klientów;
- Tokio: kabel o długości 100 m, prąd pracy 1000 A, napięcie pracy 66 kV, pierwszy kabel o trzech rdzeniach w jednym kriostacie;
- Long Island, New York: kabel o długości 600 m, prąd pracy 2400 A, napięcie pracy 138 kV.

3.3. Lewitacja magnetyczna z wykorzystaniem nadprzewodnictwa

Lewitacją (łac. *levitas* = lekkość) słowem zapożyczonym z okultyzmu, przyjęto nazywać unoszenie lub podwieszenie ciał ferromagnetycznych pod wpływem pola magnetycznego magnesów trwałych lub elektromagnesów bądź pola prądów indukowanych w litych ciałach przewodzących szybko poruszających się względem pola wzbudzającego.

Obecnie zjawisko to jest wykorzystywane na skalę przemysłową zarówno przy podwieszaniu wagonów na poduszce magnetycznej, w procesach technologicznych (topienie metali), konstrukcji maszyn (łożyska magnetyczne), jak i w diagnostyce

(np. bezdotykowe zawieszenie ciał w tunelach aerodynamicznych).

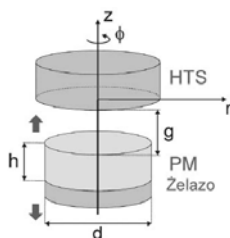
Najbardziej spektakularnym przykładem wykorzystania zjawiska lewitacji jest budowa pociągu na poduszce magnetycznej osiągającego najwyższe prędkości. W Japonii tradycje szybkich kolei związane są ze słynnym pociągiem Shinkansen kursującym między poszczególnymi miastami od Kyushu po Hokkaido z olbrzymią prędkością ponad 250 km/godzinę. Sprawna komunikacja ma olbrzymie znaczenie dla Japonii, państwa rozciągniętego na odległości rzędu 3 000 km. Program Shinkansen funkcjonuje od 40 lat i rozpatruje się obecnie następny etap – pociąg lewitujący na poduszce magnetycznej wytworzonej przez elektromagnesy nadprzewodnikowe Yamanashi Line. Pierwszy krok w tym zagadnieniu został już wykonany. W Tokio funkcjonuje połączenie centrum miasta z lotniskiem krajowym Haneda poprzez pociąg na jednej szynie - skonstruowany właśnie w oparciu o silnik liniowy. Został również zbudowany tor eksperymentalny, na którym kolejne rekordy prędkości pokonuje pociąg na poduszce magnetycznej. W Ameryce z kolei oczekuje się budowy pociągu lewitującego z wykorzystaniem elektromagnesów nadprzewodnikowych w warunkach miejskich i utworzono w tym celu projekt TEA-21 o budżecie 55 mln USD. W Niemczech istnieje projekt budowy szybkiego, lewitującego pociągu Transrapid na trasie Berlin - Hamburg.

Z chwilą pojawienia się nadprzewodników, zwłaszcza nadprzewodników wysokotemperaturowych, w wielu krajach prace nad wykorzystaniem zjawiska lewitacji do celów praktycznych zostały zintensyfikowane. Wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa stwarza ogromny potencjał rozwojowy takim gałęziom przemysłu jak energetyka i kolejnictwo.

U podstaw lewitacji magnetycznej z wykorzystaniem materiałów nadprzewodnikowych leży wzajemne odpychanie się jednorodnych biegunów magnetycznych. Jeżeli zamiast dwóch materiałów magnetycznych (lub materiału magnetycznego i diamagnetyku) użyte zostaną magnesy stałe i nadprzewodnik, uzyskany efekt będzie podobny, lecz z pewnymi różnicami natury fizycznej.

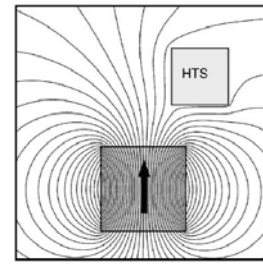
Jak zaznaczono wcześniej materiały nadprzewodnikowe ogólnie dzielą się na dwie grupy: wysoko- i niskotemperaturowe. Fakt przynależności do którejś z tych grup uwarunkowany jest temperaturą krytyczną, wszystkie natomiast podlegają tym samym prawom. Podstawowym prawem wykorzystywanym w lewitacji jest efekt Meissnera. Cechą charakterystyczną tego efektu jest wypychanie pola magnetycznego na zewnątrz nadprzewodnika. Pełną analizę zachowania się nadprzewodnika wysokotemperaturowego lewitującego w polu magnesu trwałego można znaleźć m. in. w [14].

Na rys. 14 pokazano podstawową konfigurację do analizy zjawiska lewitacji nadprzewodnika wysokotemperaturowego (HTS) w polu magnetycznym magnesu trwałego (PM), zaś na rys. 15 pokazano efekt lewitacji tego nadprzewodnika po schłodzeniu poniżej temperatury krytycznej bez obecności pola magnetycznego (nadprzewodnik jest wówczas traktowany jako doskonały diamagnetyk ($\mu_r = 0$)) [14].



Rys. 14. Podstawowa konfiguracja do badania zjawiska lewitacji z wykorzystaniem nadprzewodnika wysokotemperaturowego (HTS) i magnesu trwałego (PM)

Fig. 14. Basic configuration to study levitation using HTS and PM



Rys. 15. Nadprzewodnik wysokotemperaturowy (HTS) jako doskonały diamagnetyk ($\mu_r = 0$) lewitujący w polu magnesu trwałego (magnes trwały namagnesowany osiowo)

Fig. 15. HTS as diamagnetic ($\mu_r = 0$) in magnetic field

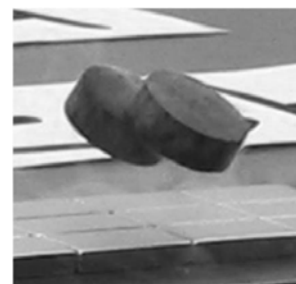
Autorzy skonstruowali tor magnetyczny z magnesów trwałych do badań i demonstracji lewitacji magnetycznej z wykorzystaniem nadprzewodników wysokotemperaturowych, który przedstawiony jest na rysunku 16.



Rys. 16. Tor magnetyczny do badań i demonstracji lewitacji magnetycznej z wykorzystaniem nadprzewodnika wysokotemperaturowego

Fig. 16. Magnetic track to study and demonstration of levitation using HTS

Rysunek 17 przedstawia fragment toru oraz nadprzewodniki wysokotemperaturowe lewitujące w polu magnesów trwałych [15].



Rys. 17. Widok lewitujących nadprzewodników wysokotemperaturowych w polu magnetycznym magnesów trwałych

Fig. 17. View of HTS levitation in magnetic field

4. Podsumowanie

Stały rozwój zagadnień nadprzewodnictwa czyni tę tematykę coraz bardziej interesującą dla inżynierów różnych specjalności, w tym szczególnie elektryków.

Nadprzewodniki niskotemperaturowe są stosowane powszechnie w uzwojeniach elektromagnesów nadprzewodnikowych na przykład w medycynie, w tomografii komputerowej. Autorzy zaprezentowali w artykule kolejną możliwość zastosowania nadprzewodnictwa w procesach technologicznych (separacja magnetyczna).

Oczekuje się według wielu prognoz, że już wkrótce zostaną skonstruowane i wdrożone pierwsze wysokotemperaturowe nad-

przewodnikowe urządzenia elektryczne. Można nawet zaryzykować stwierdzenie, że pierwsze prototypowe wdrożenie z zakresu nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego takie jak SQUID-y i słynny 120m kabel energetyczny zainstalowany w zakładach Edisonsa w Edmonton są już faktem. Stąd w artykule autorzy dokonali przeglądu potencjalnych możliwości aplikacji nadprzewodników wysokotemperaturowych w elektroenergetyce.

Odrębnym zagadnieniem, nad którym pracuje się w Katedrze Elektrotechniki jest zjawisko lewitacji magnetycznej. Również i w tej dziedzinie autorzy przedstawiają swoje osiągnięcia.

5. Literatura

- [1] Janowski T., Postęp w zastosowaniach nadprzewodników, XXIV-IC-SPETO 2001 r., 47 – 50
- [2] Tsukamoto O., Ways for power applications of high temperature superconductors to go into the real world, Superconductor Science and Technology, 17, 2004 r., nr.17, S185S190
- [3] Elder J., Domenico J.: The role of physical processing enhancing the quality of industrial minerals” Proc. 14th Industrial Minerals International Congress, Denver, Colorado, USA, March 26 – 29, 2000 r., pp. 1 – 8.
- [4] Ebner A. D., Ritter J. A., Nunez L.: High – gradient magnetic separation for the treatment of high – level radioactive wastes, Separation Science and Technology 34 (6 – 7), pp. 1333 – 1350, 1999 r.
- [5] Barrado E., Prieto F., Ribas J., Lopez F. A.: Magnetic separation of ferrite sludge a wastewater purification process, Water air and Soil Pollution 115: (1 – 4) 385 – 394) Oct. 1999 r.
- [6] Kaminski M. D., Nunez L.: Extractant – coated magnetic particles for cobalt and nickel recovery from acidic solution, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 194: (1 – 3) 31 – 36 Apr. 1999 r.
- [7] Ohara T. et al.: (2001): Magnetic separation using superconducting magnets, Physica C, 357 – 360, pp. 1272 – 1280, 2001 r.
- [8] Ekin J. W., Superconductors an emerging power technology, <http://www.boulder.nist.gov>, 2004 r.
- [9] Cieśla A. Kraszewski W. Skowron M.: Wybrane zagadnienia związane z zastosowaniem nadprzewodników wysoko temperaturowych w elektroenergetyce, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, 1/2005: pp. 49 – 53.
- [10] American Superconductor Corporation, Raport Nadprzewodnikowe wsparcie dla sieci energetycznych, Elektroenergetyka, 2, 2004 r., pp. 33 – 36.
- [11] Masuda T., Yumura H. i inni, High-temperature Superconducting Cable Technology and Development Trends, Sei Technical Review, 59, 2005 r., pp. 8 – 13.
- [12] Mukoyama S., LMaruyama S. i inni, Development of 500m HTS power cable in super-ACE project, Cryogenics, 45, 2005 r., pp. 11 – 15.
- [13] Tsukamoto O., Roads for HTS power applications to go into the real world Cost issues and technical issues, Cryogenics, 45, 2005r., pp. 3 – 10.
- [14] May H., Palka R., Portabella E., Canders W-R.:Evaluation of the magnetic field – high temperature superconductor interactions, COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vo. 23, No. 1, 2004 r., pp. 286 – 304.
- [15] Cieśla A. Kraszewski W. Skowron M.: Określenie siły działającej na wysokotemperaturowy nadprzewodnik jako element lewitujący w polu magnesów trwałych dla przyjętej geometrii układu, XXIX-IC-SPETO 2006 r., pp. 191 – 194.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Cennik publikacji reklam

w miesięczniku naukowo-technicznym PAK

Reklama	Czarno-biała	Kolorowa
I okładka	-	1 800,00
II okładka	-	1 600,00
III okładka	-	1 500,00
IV okładka	-	1 700,00
1 strona (175x250 mm)	900,00	1 100,00
½ strony (175x125mm) - pozioma	500,00	700,00
½ strony (85x250 mm)- pionowa	500,00	700,00
1/3 strony (175x85 mm)	400,00	-
¼ strony (85x125 mm)	300,00	-

Do wszystkich cen należy doliczyć 22% VAT