

## Pole magnetyczne jako źródło energii w nadprzewodnikowych zasobnikach energii

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problematykę przesyłu energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym, opisano podstawowe cechy systemu. Wskazano na rozwój systemu i aktualne trendy zmian jego struktury. Zdefiniowano pojęcie Smart Grids. Wskazano na konieczność obecności w systemie zasobników energii. Spośród wielu rozwiązań konstrukcyjnych, autorzy skoncentrowali się na nadprzewodnikowych zasobnikach energii (SMES - Superconductor Magnetic Energy Storage).

**Abstract.** In the article the matter of energy transmission in the electric power system was presented and basic features of the system were described. System development and current trends of its structure changes were indicated. Concept of Smart Grids was defined. The necessity of the energy storage in the system was indicated. Among many design solutions, the authors focused on Superconductor Magnetic Energy Storage (SMES). **Magnetic fields as a source of energy in superconducting magnetic energy storage.**

**Słowa kluczowe:** system elektroenergetyczny, Smart Grids, nadprzewodnikowe zasobniki energii (SMES), pole magnetyczne.  
**Keywords:** power engineering system, Smart Grids, superconducting magnetic energy storage (SMES), magnetic field.

### Wstęp

Wprowadzenie do systemu energetycznego na dużą skalę źródeł energii odnawialnej (OZE) generuje szereg problemów. Jednym z nich jest dostawa energii z tych źródeł, ze względu na nieprzewidywalność wartości mocy wyjściowej np. z farmy wiatrowej czy fotowoltaicznej. Źródła odnawialne dostarczają - lub nie - energii, niezależnie od zapotrzebowania. Rozwiązaniem tego problemu jest magazynowanie i przechowywanie energii elektrycznej. Systemy zasobnikowe pozwalają gromadzić energię wytwarzaną w okresach niskiego popytu, albo przy niskim koszcie wytwarzania, lub z odnawialnych źródeł energii i wykorzystywać ją w okresach wysokiego popytu, wysokich kosztów wytwarzania lub gdy żadna inna technologia wytwarzania nie jest dostępna. Zasobniki energii mają wiele zastosowań: jako źródła mobilne lub stacjonarne, w energetyce, w sieciach przesyłowych, rozproszonych źródłach energii, energii odnawialnej oraz u lokalnych odbiorców i stały się istotnym elementem nowoczesnej sieci typu Smart Grids. Istnieje kilka typów technologii magazynowania energii różniących się właściwościami w zakresie mocy wyjściowej, czasu przechowywania, wartości gromadzonej energii i szybkości reakcji. Z jednej strony są systemy takie jak elektrownie wodne, które mają dużą moc i zdolność do zasilania sieci przez długi okres czasu, jednak mają długi czas rozruchu i nie nadają się do szybkich reakcji na wahania napięcia. Z drugiej strony są urządzenia o bardzo krótkim czasie reakcji i stosunkowo dużej mocy. Należą do nich nadprzewodnikowe zasobniki energii (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage), gromadzące energię w polu magnetycznym generowanym przez uzwojenie nadprzewodnikowe, w którym prąd płynie bez strat [1]. Koncepcja nadprzewodnikowego zasobnika energii opiera się na zjawiskach, które nie mają zastosowania w innych technologiach magazynowania energii: materiały nadprzewodnikowe przewodzą prąd bez strat rezystancyjnych. Prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne, jako formę czystej energii, którą można przechowywać. Działanie takiego urządzenia jest możliwe tylko przy wykorzystaniu technologii nadprzewodnikowych ze względu na straty rezystancyjne w konwencjonalnych przewodnikach. Połączenie wymienionych cech umożliwiła budowę bardzo wydajnego zasobnika energii elektrycznej z uzwojeniem nadprzewodnikowym. Jedynym procesem konwersji energii w układzie SMES'a jest zamiana prądu przemiennego (AC) na stały (DC) i odwrotnie. W rezultacie,

nie ma żadnych strat termodynamicznych związanych z konwersją jednego rodzaju energii na drugi.

W porównaniu do innych systemów magazynowania energii zasobniki nadprzewodnikowe charakteryzują się wysoką sprawnością (do 95%) z powodu niewystępowania strat rezystancyjnych. Mają także krótki czas reakcji ze względu na działanie oparte wyłącznie na przemianach energii elektrycznej, bez udziału innych rodzajów energii, np. mechanicznej, ale także duży przewidywany czas eksploatacji (do 30 lat), są przyjazne dla środowiska wobec braku toksycznych materiałów eksploatacyjnych i niezawodne ze względu na brak ruchomych elementów. Uważa się, że nadprzewodnikowe zasobniki energii mogą odegrać ważną rolę w rozwoju i modernizacji infrastruktury sieci przesyłowych oraz integracji odnawialnych źródeł energii z siecią energetyczną [2].

### Koncepcja nowego (inteligentnego) systemu elektroenergetycznego

Energia elektryczna jest towarem, który ma określone parametry. Jest oczywiste, że w zależności od częstości użytkowania nabywane dobro nie może być użytkowane w nieskończoność. W skali znacząco większej - skali sieci europejskich - sytuacja jest podobna: rosnące zapotrzebowanie na usługi energetyczne, ambitne europejskie cele w zakresie zapobiegania zmianom klimatycznym - również na drodze zwiększenia roli zasobów odnawialnych (OZE) - oraz zwiększone wymagania w obszarze bezpieczeństwa dostaw i konkurencyjności stwarzają pilną konieczność gruntownej modernizacji i rozszerzenia funkcji tradycyjnie pełnionych przez sieci elektroenergetyczne. Potrzeby te sprawiły, że w 2005 roku ustanowiona została europejska platforma technologiczna w celu opracowania spójnej wizji sieci dla Europy w perspektywie roku 2020 i dalszej. Ale jeszcze bardziej ambitnym celem jest przekształcenie tej wizji w funkcjonujące w praktyce rozwiązanie. W najbardziej potocznym rozumieniu zadaniem nowej „sieci inteligentnej” („Smart Grids”) jest dostarczanie konsumentom energii elektrycznej (lub szerzej traktując - usług energetycznych) z wykorzystaniem techniki cyfrowej, zapewnianiem obniżenia kosztów i zwiększenie efektywności umożliwiającej dwukierunkowe przepływy energii oraz zintegrowanie źródeł rozproszonych, w tym wykorzystujących zasoby odnawialne [3].

Tradycyjne struktury sieci były konstruowane dla jednokierunkowego przesyłania energii elektrycznej i nie

miały zdolności integracji zasobów rozproszonych. Były one w istocie dostosowane do warunków systemów, zdominowanych przez duże, scentralizowane źródła węglowe, wodne, jądrowe lub gazowe, a ponieważ centralizacja zapewniła efekt ekonomiki skali, taka struktura mocy wytwórczych powodowała lokalne nadwyżki „taniej energii” a odwrócenie kierunku rozptyłów dla eksportu nadmiaru generacji prowadziło do poważnych problemów technicznych w zakresie bezpieczeństwa i niezawodności pracy [3].

Sieć inteligentna miałaby większe szanse opanowania kaskadowego rozwoju zdarzeń chociażby na drodze ograniczenia wartości mocy, przepływających przez sieć przesyłową. Pod wspomnianym wyżej pojęciem SMART GRIDS rozumie się Europejską platformę technologiczną „Sieci inteligentne”. To system elektroenergetyczny integrujący w sposób inteligentny działania wszystkich uczestników procesów generacji, transmisji, dystrybucji i użytkowania, w celu dostarczania energii elektrycznej w sposób ekonomiczny, pewny i bezpieczny [4].

Nowa platforma technologiczna powinna być [4]: inteligentna – reagująca na przeciążenia sieci, działająca autonomicznie, zanim obsługujący system człowiek będzie w stanie podjąć decyzję o działaniu, dostosowująca się równocześnie do potrzeb dostawcy, odbiorcy i regulatora, wydajna – zdolna spełniać rosące potrzeby odbiorcy bez potrzeby rozbudowy infrastruktury, elastyczna – akceptująca każde źródło energii, zdolna zaadoptować każdą nową, sprawdzoną ideę, czy technologię, motywująca – poprzez możliwość bieżącej komunikacji na linii dostawca – odbiorca sieci, smart grids umożliwia odbiorcy indywidualne, zarządzanie konsumpcją energii w zależności od preferencji takich jak koszty czy ekologia, wysokiej jakości – zdolna zaopatrywać coraz wrażliwsze na zmiany napięcia urządzenia w najwyższej jakości energię – bez obniżek napięcia, przerw w dostawach czy zakłóceń, odporna – na ataki terrorystyczne czy katastrofy naturalne poprzez decentralizację systemu oraz wzmocnione protokoły bezpieczeństwa, ekologiczna – spowalniająca zmiany klimatyczne, a także oferująca oryginalne rozwiązania w celu działań proekologicznych. Nietypowe – jak dotąd - źródła generacji rozproszonej mogą być umieszczone w budynku mieszkalnym bądź użyteczności publicznej tworząc rozproszony system elektroenergetyczny.

Ważnym problemem pojawiającym się podczas eksploatacji alternatywnych źródeł energii jest okresowość występowania generacji energii. Promieniowanie słoneczne dociera do ziemi tylko w ciągu dnia, i to pod warunkiem braku zachmurzenia. Generator wiatrowy produkuje energię tylko powyżej pewnej prędkości wiatru. Z tego względu w układach z alternatywnymi źródłami energii jednym z istotnych problemów jest jej magazynowanie.

W technice wykorzystywane są różne sposoby magazynowania energii [5]: baterie akumulatorów, kompresyjne zasobniki energii, elektrownie szczytowo-pompowe, kinetyczne zasobniki energii, superkondensatory, ogniwa paliwowe, nadprzewodnikowe magnetyczne zasobniki energii. W dalszej części artykułu uwagę autorzy poświęcą właśnie temu ostatniemu sposobowi gromadzenia energii.

### Nadprzewodnikowe zasobniki energii (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES)

Odkrycie zjawiska nadprzewodnictwa i wytworzenie przewodów nadprzewodnikowych: LTS (Low Temperature Superconductors – nadprzewodniki „niskotemperaturowe” pracujące w temperaturach helowych) w latach sześćdziesiątych XX wieku i HTS (High Temperature Superconductors – nadprzewodniki „wysokotemperaturowe”

pracujące w temperaturach azotowych) w latach dziewięćdziesiątych XX wieku, o gęstości prądu 2 rzędu większej niż w przewodach miedzianych, pozwoliło budować uzwojenia generujące pola magnetyczne o nieosiągalnych dotąd indukcjach i dużych wartościach gromadzonej energii.

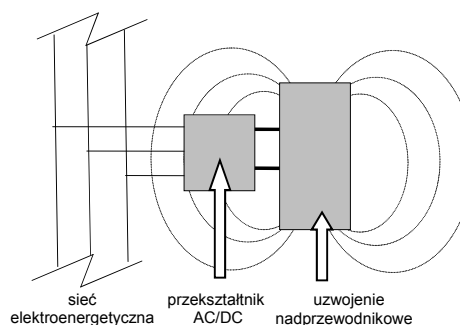
O niektórych aspektach zjawiska nadprzewodnictwa i potencjalnych możliwościach jego aplikacji, można przeczytać m.in. w: [6 – 8].

Wśród najbardziej zaawansowanych technologicznie i aplikacyjnie silnoprądowych urządzeń nadprzewodnikowych znajdują się nadprzewodnikowe ograniczniki prądu oraz nadprzewodnikowe zasobniki energii [1]. Mimo, iż prowadzone prace badawcze i projektowe wskazują na obiecujące perspektywy zastosowań obu typów urządzeń nadprzewodnikowych, to w chwili obecnej jedynie nadprzewodnikowe zasobniki energii osiągnęły etap jeszcze ograniczonego, ale komercyjnego zastosowania w sieciach elektroenergetycznych. Zasobniki te – jak napisano we Wstępie – charakteryzują się dużymi sprawnościami i długim czasem eksploatacji, są przyjazne dla środowiska i niezawodne ze względu na brak ruchomych elementów.

Pomysł magazynowania energii elektrycznej w polu magnetycznym cewki powstał ponad 100 lat temu, natomiast wykorzystanie materiałów nadprzewodnikowych do tego rodzaju urządzeń zaproponowane zostało w latach 60 XX wieku. W 1969 roku zaproponowano pierwsze urządzenie wykorzystujące uzwojenie nadprzewodnikowe do magazynowania energii elektrycznej. Pionierskie prace nad budową nadprzewodnikowych zasobników były prowadzone w Uniwersytecie w Wisconsin, który w roku 1970 podjął badania naukowe związane z urządzeniem SMES. W [1], [2] opisano projekty i ich realizację w różnych krajach.

### Działanie SMES

Funkcjonalnie SMES różni się od innych technologii magazynowania energii tym, że magazynowana energia jest generowana dzięki ciągłemu przepływowi prądu w uzwojeniu nadprzewodzącym. Ponadto jedynym procesem konwersji w układzie SMES jest zamiana prądu przemiennego (AC) na stały (DC) i odwrotnie. W rezultacie, nie ma żadnych strat termodynamicznych związanych z konwersją jednego rodzaju energii na inny.



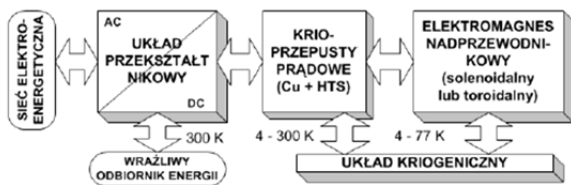
Rys. 1. Idea działania SMES

Nadprzewodnikowe zasobniki energii charakteryzuje bardzo duża gęstość mocy, którą można pobrać lub oddać w bardzo krótkim czasie, dlatego głównym obszarem zastosowań systemów SMES jest zabezpieczenie przed nieplanowanymi przerwami w dostawie energii, zapewnienie jakości dostarczanej energii elektrycznej poprzez łagodzenie efektów chwilowych zaników napięcia, a także do wyrównywania obciążeń mocy odbiorników energii pracujących w sposób impulsowy lub przerywany. Możliwości zastosowania SMES przedstawia tabela 1 [2].

Tabela 1. Potencjalne zastosowania SMES-ów [2]

zastosowanie	energia	czas rozładowania
wyrównywanie szczytów	50 MJ 180 GJ	minuty, godziny
poprawa jakości energii	0,1 MJ 10 MJ	sekundy
lokalne źródło mocy	0,1 MJ 10 MJ	dziesiątki mikrosekund
współpraca ze źródłami małej mocy i innymi źródłami energii, współpraca z rozproszonymi źródłami energii, współpraca z systemami fotowoltaicznymi i akumulatorowymi	5 - 50 kJ	sekundy

Nadprzewodnikowy zasobnik energii włączony do systemu elektroenergetycznego, współpracuje z nim poprzez elektroniczny konwerter, który umożliwia dwukierunkowy przepływ energii pomiędzy siecią elektryczną i elektromagnesem nadprzewodnikowym (rys. 2) [2].

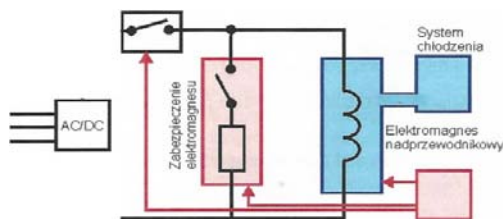


Rys. 2. Schemat układu nadprzewodnikowego zasobnika energii współpracującego z siecią elektroenergetyczną [2]

Opracowane i realizowane w ostatnich latach projekty przemysłowych zastosowań SMES-ów obejmują trzy grupy:

- układy  $\mu$ SMES o energiach rzędu MJ wchodzących częściowo w fazę komercjalizacji,
- układy energiach rzędu GJ (lub MWh), będące jeszcze w fazie studiów projektowych i konstrukcyjnych,
- zasobniki wysokotemperaturowe o niewielkich energiach w zakresie kilodżuli.

Nadprzewodnikowy zasobnik energii zbudowany jest z trzech podstawowych elementów: uzwojenia nadprzewodzącego, kondycjonera mocy (układ PCS) oraz układu chłodzenia. Elementy te są rozbudowane o układ sterowania i kontroli, system zasilania i zabezpieczeń (np. detektor quenchu) (rys. 3) [2].



Rys. 3. Struktura nadprzewodnikowego zasobnika energii [2]

Czas pracy zasobnika to trzy etapy:

- etap 1:** Ładowanie uzwojenia prądem trójfazowym z sieci poprzez układ przekształtnikowy PCS. Uzwojenie generuje pole magnetyczne i gromadzi energię;
- etap 2:** Uzwojenie nie jest zasilane – prąd płynie w nadprzewodniku bez strat. Energia jest zgromadzona;
- etap 3:** Odpowiedź na zapotrzebowanie w sieci – energia jest wyzwolana z uzwojenia i poprzez układ przekształtnikowy oddawana do sieci.

## Uzwojenie nadprzewodnikowego zasobnika energii

Projektowanie zasobnika energii polega na takim doborze materiału, konfiguracji i wartości prądu w uzwojeniu, aby przy minimalnym zużyciu materiału nadprzewodnikowego, uzyskać największą energię, przy zachowaniu bezpieczeństwa użytkowników i otoczenia.

Energię magazynową w polu magnetycznym elektromagnesu nadprzewodnikowego można wyznaczyć na dwa sposoby, z zależności:

$$(1) \quad E = \frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV$$

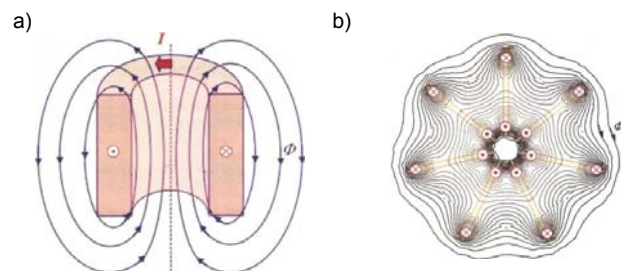
z której widać zależność energii od objętości przestrzeni  $V$ , w której istnieje pole magnetyczne o natężeniu  $H$ , ( $\mu$  jest przenikalnością magnetyczną ośrodka), bądź z zależności:

$$(2) \quad E = \frac{1}{2} LI^2$$

gdzie  $L$  oznacza indukcyjność uzwojenia elektromagnesu, a  $I$  – prąd płynący w uzwojeniu elektromagnesu.

Powyższe zależności wskazują dwie możliwości projektowe: jedna z nich to konstrukcja prostego uzwojenia o znacznej objętości, natomiast druga to konstrukcje uzwojeń, w których geometria umożliwia uzyskanie dużych wartości indukcyjności  $L$ .

O kształcie uzwojenia nadprzewodnikowego decydują trzy podstawowe czynniki: wytrzymałość na wewnętrzne naprężenia w uzwojeniu, naprężenia termiczne powstające podczas chłodzenia uzwojenia, siły Lorentza generowane podczas przepływu prądu w uzwojeniu [2]. W praktyce rozważane są dwie konfiguracje uzwojeń: solenoidalna i toroidalna (rys. 4) [2].

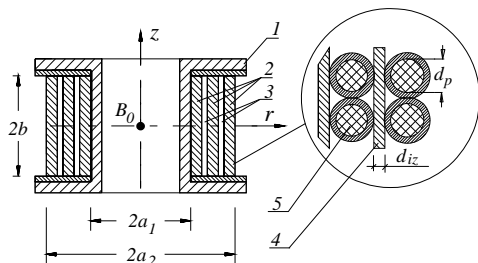


Rys. 4. Linie pola magnetycznego  $\Phi$  uzwojenia w konfiguracji solenoidalnej (a) i toroidalnej (b) [2]

W rozwiązaniach z uzwojeniem solenoidalnym istotną zaletą jest prosta konstrukcja uzwojenia oraz większa gęstość energii na jednostkę długości przewodu nadprzewodnikowego. Uzwojenie toroidalne jest technologicznie trudniejsze do wykonania, ponadto jego energetyczne osiągi są mniej korzystne [2]. Tak więc uzwojenie solenoidalne jest preferowane na obecnym etapie rozwoju SMES. W dalszej części autorzy skoncentrują na tej właśnie geometrii.

Projektowanie uzwojenia nadprzewodnikowego różni się od analogicznego procesu w przypadku uzwojeń konwencjonalnych. Wartość pola magnetycznego i gęstości prądu są zmiennymi nie tylko wpływającymi na naprężenia i nagrzewanie uzwojenia, ale są także powiązane ze sobą ze względu na charakterystyki i parametry krytyczne nadprzewodnika. Szereg zależności i wytycznych do projektowania uzwojeń nadprzewodnikowych zostało już szczegółowo opisane w pracach Wilsona i Montgomery'ego i wielokrotnie weryfikowane w późniejszych publikacjach naukowych [2].

Na rysunku 5 pokazano przekrój poprzeczny "klasycznego" uzwojenia nadprzewodnikowego w kształcie prostokąta. Jest to przykład uzwojenia zanurzonego w kąpeli helowej. Na karkas nawinięto kilka sekcji zwojów przedzielonych kanałami chłodzącymi. Problemy związane z projektowaniem i konstruowaniem takiego uzwojenia była przedmiotem wielu już rozważań. Obecnie – stosując chłodzenie kontaktowe uzwojenia przy pomocy kriochłodziarki – konstrukcja ta zdecydowanie upraszcza się (np. nie są wymagane kanały chłodzące).



Rys.5. Przekrój wzdłużny cewki nadprzewodnikowej: 1 – karkas uzwojenia, 2 – sekcje uzwojenia, 3 – kanały chłodzące, 4 – izolacja międzywarstwową (folia poliestrowa), 5 – przewód nadprzewodnikowy w izolacji

W punkcie centralnym uzwojenia ( $z = 0, r = 0$ ) indukcję pola magnetycznego określa zależność:

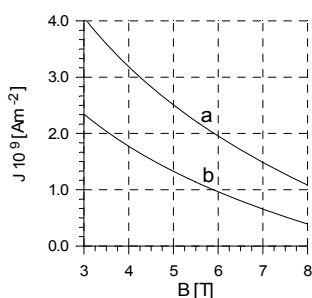
$$(3) \quad B_0 = \mu_0 a_1 J K_0(\alpha, \beta)$$

w której:

$$(4) \quad K_0(\alpha, \beta) = \beta \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}$$

jest tzw. współczynnikiem Febrí'ego [2], który uwzględnia wymiary geometryczne uzwojenia.

Przy konstruowaniu uzwojenia nadprzewodnikowego solenoidu wprowadza się zatem dwa bezwymiarowe współczynniki uzwojenia:  $\alpha = a_2/a_1$  oraz  $\beta = b/a_1$  a także współczynnik wypełnienia uzwojenia nadprzewodnikiem:  $\lambda = S_{cNbTi} / S_{całk}$ .



Rys. 6. Zależność gęstości prądu w nadprzewodniku od wartości indukcji magnetycznej: a – zależność dla krótkiego odcinka nadprzewodnika, b – charakterystyka uwzględniająca efekt degradacji nadprzewodnika

Uwzględniając charakterystykę zależności prądu w nadprzewodniku od indukcji pola magnetycznego, w którym ten nadprzewodnik się znajduje (Rys. 6), można – korzystając z zależności (3) i (4) – dokonać obliczeń, pozwalających na skonstruowanie optymalnego – w rozumieniu kształtu - uzwojenia. Uzupełnieniem zależności (3) i (4) jest zależność (5), która wiąże kształt uzwojenia z jego objętością:

$$(5) \quad V = 2\pi a_1^3 \beta (\alpha^2 - 1)$$

Jednym z problemów w rozwiązaniach z uzwojeniem solenoidalnym jest występowanie silnego pola magnetycznego w dużym obszarze wokół uzwojenia, co w urządzeniach o dużych wartościach energii rzędu MJ i GJ powoduje, że natężenie pola magnetycznego w otoczeniu SMES'a przekracza wartości dopuszczalne normami i utrudnia jego bezpieczne użytkowanie. Zalety prostej konstrukcji i mniejszych gabarytów uzwojenia nadprzewodnikowego (co było przedmiotem niniejszych rozważań), są w części niwelowane niekorzystnym oddziaływaniem pola magnetycznego na otoczenie. Opracowywane aktualnie konstrukcje są wynikiem kompromisu pomiędzy potrzebą uzyskania maksymalnej energii, a koniecznością ograniczenia oddziaływania pola magnetycznego na otoczenie. Problem oddziaływania pola magnetycznego na otoczenia jest zagadnieniem odrębnym i wymaga rozważań dotyczących problematyki ekranowania pól magnetycznych.

### Podsumowanie

W ramach podsumowania powyższych rozważań, należy stwierdzić, że obecnie dostępne na rynku przewody nadprzewodnikowe (zarówno nisko- (LTS) jak i wysokotemperaturowe (HTS)) umożliwiają budowę nadprzewodnikowych zasobników energii (SMES), czyli elementów niezbędnych do właściwego funkcjonowania inteligentnych systemów energetycznych.

W nadprzewodnikowych zasobnikach energii, w których uzwojenie wykonane jest w prostszej – solenoidalnej – konstrukcji, występuje problem znacznej wartości tego pola wokół urządzenia (w porównaniu z wartościami wyznaczonymi obowiązującymi normami). Wymaga to analizy problemu ekranowania pola magnetycznego. W pracy [2] znaleźć można opis skonstruowanego i zbudowanego SMES'a w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych IEL Laboratorium w Lublinie

**Autorzy:** prof. nz. AGH, dr hab. inż. Antoni Cieśla, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [aciesla@agh.edu.pl](mailto:aciesla@agh.edu.pl), dr inż. Mikołaj Skowron, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [mskowron@agh.edu.pl](mailto:mskowron@agh.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Janowski T. i inni: *Nadprzewodnikowe zasobniki energii*, Wydawnictwo – Drukarnia „Liber DUO s.c.” Lublin 2007.
- [2] Kondratowicz-Kucewicz B.: *Analiza wpływu konfiguracji uzwojeń na gromadzoną energię i rozkład pola magnetycznego w nadprzewodnikowym zasobniku energii*. Rozprawa doktorska. Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2016 r.
- [3] Cieśla A., Moskwa Sz.: *Wybrane problemy przesyłu energii elektrycznej*. Wybrane problemy energetyki i ochrony środowiska, Monografie Katedry Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska WIMiR AGH, Kraków, 2015.
- [4] Malko J., Wojciechowski H.: *Europejska platforma technologiczna sieci inteligentnych „SmartGrids” „Instal”*, nr 12/2009.
- [5] Zarębski T: *Problemy magazynowania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł* „Energetyka”, marzec 2008.
- [6] Cieśla A: *Nadprzewodnictwo w stulecie odkrycia: wybrane przykłady zastosowań*. Przegląd Elektrotechniczny, 12a, 2011.
- [7] Krawczyk A., Xose M., Lopez Fernandez, Wiak S.: *100 Anniversary of the Discovery of Superconductivity ISEF'2011*.
- [8] Lebioda M., Rymaszewski J., Korzeniewska E.: *Zastosowania taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji do wytwarzania silnych pól magnetycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, nr 12, s. 265-268