

Transpozycjonery nadprzewodnikowych taśm równoległych jako alternatywa dla kabla Roebela

Streszczenie. W budowie transformatorów HTS koszt uzwojeń stanowi ponad połowę kosztów całkowitych, co przesądza o małym zainteresowaniu energetyki. Dotychczasowe doświadczenie autorów w zakresie projektowania i budowy modeli fizycznych elektrycznych urządzeń nadprzewodnikowych (elektromagnesy, transformatory, ograniczniki prądów zwarcia) wskazuje, że wyrównanie reakcji w taśmach równoległych uzwojeń transformatora można wykonać dla całych cewek w odpowiednich „transpozycjonerach”, uzyskując efekt jak w kablu Roebela.

Abstract. The construction cost of the HTS transformer windings is more than half of the total transformer cost, which determines the low interest in the energy sector. Previous experience of the authors in the design and construction of physical models of superconducting electric devices (electromagnets, transformers, fault current limiters) indicates that the transposition in parallel connected tapes, can be made for all coils in the appropriate "transpositioners" to give effect similar as the Roebel CTC cable (Continuously Transposed Cable). **Transpositioners of the parallel connected superconducting tapes as an alternative to Roebel cable**

Słowa kluczowe: transformatory nadprzewodnikowe, taśmy nadprzewodnikowe HTS drugiej generacji, kabel Roebela, budowa uzwojeń
Keywords: superconducting transformer, 2G HTS tapes, Roebel cable, windings construction

Wstęp

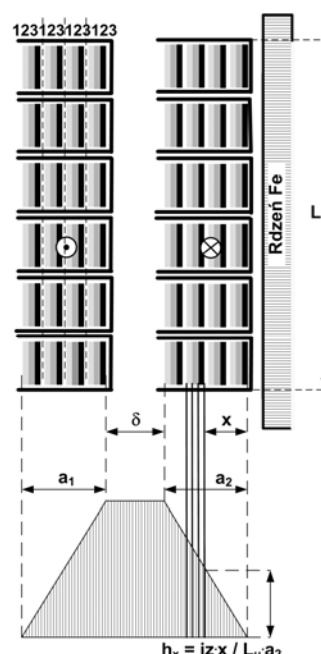
Wytwarzana w elektrowniach całego świata energia elektryczna jest przynajmniej trzykrotnie przetworzona (transformowana) w transformatorach systemów elektroenergetycznych. Pomimo dużej sprawności transformatorów energetycznych (97,5 ÷ 99,8 %), traci się w nich ponad 5 ÷ 10 % wytwarzanej energii elektrycznej. Większość strat powstaje w uzwojeniach wykonanych z miedzi, której rezystywności nie można zmniejszyć [1-2]. Próby zastosowania w transformatorach uzwojeń z nadprzewodników niskotemperaturowych (LTS – NbTi, Nb₃Sn), w latach 70-tych ubiegłego stulecia oraz wysokotemperaturowych (HTS – BSCCO) nie dały dotychczas pomyślnych rezultatów.

Nowa sytuacja w zakresie nadprzewodnikowych transformatorów powstała po wytworzeniu w latach 2004 – 2007 wysokotemperaturowych, nadprzewodnikowych przewodów warstwowych, komercyjnie oferowanych od 2008 roku. Przewody te mogą być stosowane w silnopiędowych urządzeniach przemiennej. Nadprzewodnikowe przewody taśmowe HTS drugiej generacji (2G) mają warstwę nadprzewodnika o grubości około 1 μm, a podłoże o dużej rezystywności i stabilizator ciepły stanowią o grubości taśmy.

Z uwagi na konieczność chłodzenia nadprzewodnikowych transformatorów ciekłym azotem optymalnym będzie stosowanie jednostek większych mocy, których prądy przekraczają wartości dopuszczalne dla obecnie wytwarzanych taśm HTS [3]. Ze względów technologicznych wytwarzania taśm HTS 2G i strat przemiennoprądowych indukowanych w warstwach nienadprzewodzących taśmy, ich szerokość nie przekracza 12 mm, a prądy krytyczne w polu własnym wynoszą około (300÷400) A. W transformatorach większych mocy konieczne jest stosowanie wielu taśm równoległych a to prowadzi do różnych prądów w taśmach i ich niepełnego wykorzystania. Objawia się to przejściem do stanu rezystywnego taśmy o mniejszej reakcji rozproszenia w skutek przekroczenia prądu krytycznego.

Uzwojenia transformatorów nadprzewodnikowych

W przypadku, gdy prądy robocze uzwojeń są większe od prądu krytycznego użytej taśmy nadprzewodnikowej, uzwojenia wykonuje się pakietem taśm równoległych [4], rys.1.



Rys. 1. Schemat uzwojenia nadprzewodnikowego nawiniętych trzema taśmami równoległymi (1-2-3): h_x – wartość chwilowa natężenia pola magnetycznego, a_1 , a_2 – szerokość uzwojeń, L_u – wysokość uzwojeń, δ – szczelina powietrzna

Ze względu na różne średnice poszczególnych zwojów wewnątrz uzwojenia, a tym samym różną długość taśm w każdej warstwie, rezystancje i reaktancje poszczególnych taśm równoległych – skojarzonych z różnymi strumieniami rozproszenia, nie są jednakowe [5]. Jeżeli przyjmiemy, że w stanie nadprzewodzącym rezystancja uzwojenia $R = 0$, a reaktancja $X_1 > X_2 > X_3 > X_n$ to w poszczególnych warstwach taśm równoległych popłyną prądy wyrównawcze $I_{w1} < I_{w2} < I_{w3} < I_{wn}$. Prądy wyrównawcze przyczyniają się do niepełnego wykorzystania taśm nadprzewodnikowych. Ponieważ sumaryczny prąd w najbardziej obciążonej taśmie równoległej (prąd wyrównawczy + prąd roboczy) może przekroczyć wartość prądu krytycznego zastosowanej taśmy nadprzewodnikowej, konieczne jest nawinięcie

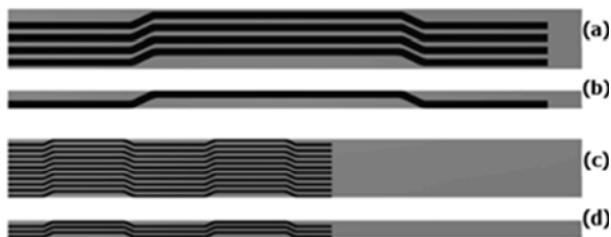
uzwojenia taśmą o większym prądzie krytycznym, co wpłynie na wzrost kosztu uzwojenia [6].

Wyrównanie reaktancji poszczególnych warstw uzwojenia, a tym samym eliminację prądów wyrównawczych, można uzyskać przez transpozycję taśm. W przypadku uzwojeń transformatorów konwencjonalnych wykonanie transpozycji nie stwarza większych trudności. Natomiast wykonanie „klasycznej” transpozycji taśm nadprzewodnikowych jest w zasadzie niemożliwe ze względu na ich właściwości mechaniczne oraz proporcje w szerokości i grubości taśmy.

Kable Roebela

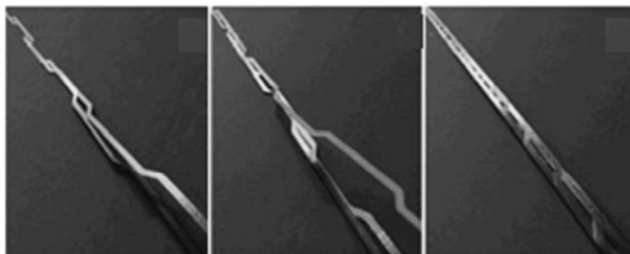
Obecnie największe nadzieje na ograniczenie prądów wyrównawczych w uzwojeniach nadprzewodnikowych transformatorów wiąże się ze stosowaniem przewodu CTC (Continuously Transposed Cable) – kabla Roebela, o ciągłej transpozycji przewodu nadprzewodnikowego [7-8]. Idea tego kabla polega na odpowiednim ukształtowaniu i złożeniu (zapleceniu) pakietu równoległych taśm nadprzewodnikowych (wcześniej odpowiednio wyciętych), których liczba w pakiecie zależy od wymaganej wartości prądu krytycznego przewodu oraz spodziewanej wartości prądu krytycznego kabla [7].

„Bazowe” taśmy nadprzewodnikowe wykonane z nadprzewodnika HTS 2G o szerokości 12 mm lub 40 mm i grubości $(0,1\pm 0,2)$ mm tną się na odpowiednio ukształtowane węższe „tasiemki” o szerokości 2 mm lub 5 mm. Prąd krytyczny taśmy o szerokości 5 mm wynosi około 100 A, a taśmy o szerokości 2 mm – około 50 A (rys. 2).



Rys. 2. Cięcie taśmy HTS 2G na odpowiednio ukształtowane odcinki (tasiemki): a) taśma HTS – 40 mm, 4 odcinki o szerokości 5 mm, b) taśma HTS – 12 mm, 1 odcinek o szerokości 5 mm, c) taśma HTS – 40 mm, 10 odcinków o szerokości 2 mm, d) taśma HTS – 12 mm, 3 odcinki o szerokości 2 mm

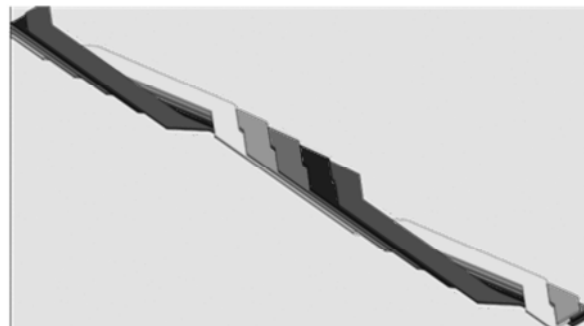
Aby uzyskać kabel Roebela o prądzie krytyczny 1000 A należy użyć 10 tasiemek o szerokości 5 mm (kabel 10/5) lub 20 tasiemek o szerokości 2 mm (kabel 20/2). Dla innych wartości prądu krytycznego liczba tasiemek w kablu będzie inna. Na rys. 3 przedstawiono proces składania (zaplatania) wyciętych tasiemek w pakiet kabla Roebela.



Rys. 3. Proces składania kabla Roebela

Rysunek 4 przedstawia strukturę kabla Roebela 5/5, o prądzie krytycznym 500 A, a rys. 5 kabla 10/5, o prądzie krytycznym 1000 A. Oba te rysunki dobrze obrazują ideę ciągłego przeplotu (transpozycji) taśm.

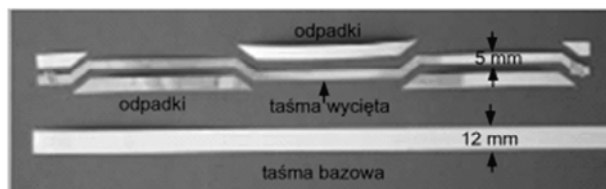
Ze względu na wymagania technologiczne stawiane procesowi cięcia taśmy bazowej oraz procesowi ciągłej transpozycji, a także ze względu na duże straty w materiale taśmy bazowej podczas cięcia (rys. 6) cena kabla Roebela jest wysoka. Przykładowa cena 1 metra kabla Roebela 10/5 (10 taśm/ 5 mm szerokich – łączna szerokość taśmy 12 mm) o prądzie krytycznym 1000 A wynosi około 3000 USD (dane producenta). Z tego względu kable te nie są powszechnie dostępne i produkowane są tylko na zamówienie.



Rys. 4. Kabel Roebela 5/5 – 500 A. Kolorami oznaczono układ poszczególnych tasiemek w kablu



Rys. 5. Kabel Roebela 10/5 – 1000 A



Rys. 6. Starty materiału podczas cięcia taśmy bazowej

Transpozycjonery równoległych taśm nadprzewodnikowych

„Tradycyjne” nawinięcie uzwojenia transformatora pakietem taśm nadprzewodnikowych połączonych równolegle jest rozwiązaniem znacznie tańszym. Liczba taśm w pakiecie zależy od prądu krytycznego uzwojenia, a tym samym od wartości prądu krytycznego zastosowanej taśmy HTS. Za takim rozwiązaniem przemawia cena taśm nadprzewodnikowych 2G, która jest kilkakrotnie mniejsza od ceny kabla Roebela.

W tabeli 1 zamieszczono wartości prądów krytycznych oraz ceny taśm nadprzewodnikowych HTS 2G, produkcji SuperPower Inc. Prezentowane taśmy o szerokości 4 mm i 12 mm i prądach krytycznych od 80 A do 300 A dedykowane są na uzwojenia transformatorów nadprzewodnikowych. W tabeli 2 podano liczbę taśm (z tab. 1) połączonych równolegle, aby nawinać uzwojenie na prąd krytyczny 1000 A, grubość pakietu taśm oraz cenę jednostkową takiego pakietu.

Tabela 1. Prąd krytyczny oraz cena taśm HTS 2G produkcji SuperPower Inc., przeznaczonych na uzwojenia transformatorów nadprzewodnikowych [9]

Taśma nadprzewodnikowa HTS 2G produkcji SuperPower Inc	Prąd krytyczny I_c , A	Cena, USD/m
SCS 4050	100	85
SF 4050	100	65
SCS 12050	300	130
SCS 12050	240	115
SF 12050	300	110
SF 12050	240	105
taśmy SCS dodatkowo laminowane miedzią taśmy SCS - szerokość 4 lub 12 mm, grubość 0,095 mm taśmy SF - szerokość 4 mm lub 12 mm, grubość 0,055 mm		

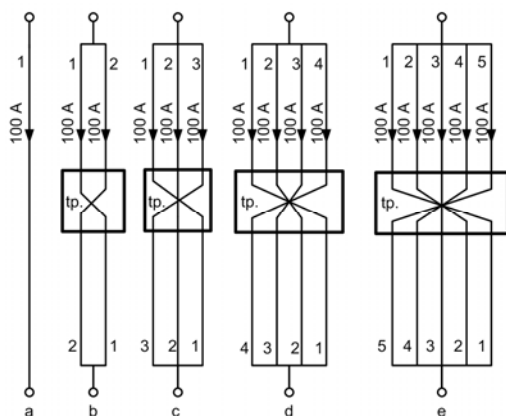
Tabela 2. Liczba taśm w pakiecie, grubość i cena pakietu o prądzie krytycznym 1000 A, w temperaturze 77 K

Taśma	Liczba taśm połączonych równolegle	Grubość pakietu taśm (z uwzględnieniem izolacji), mm	Cena pakietu taśm, USD/m
SCS 4050, 100 A	10	1,5	850
SF 4050, 100 A	10	1,1	650
SCS 12050, 300 A	4	0,6	520
SF 12050, 300 A	4	0,5	460
Grubość kabla Roebela 10/5, 1000 A – około 2 mm			

Wraz ze wzrostem wartości prądu krytycznego taśmy liczba taśm połączonych równolegle maleje, a tym samym maleje cena jednostkowa pakietu taśm, nawet jeżeli cena jednostkowa taśmy rośnie wraz ze wzrostem wartości jej prądu krytycznego.

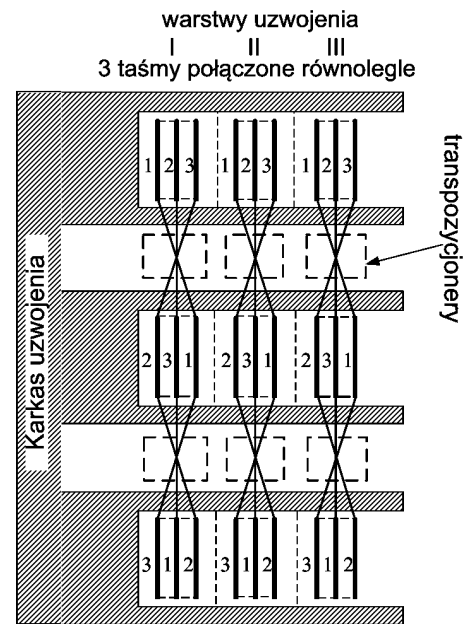
Aby całkowicie wyrównać rozptył prądu w taśmach HTS 2G, połączonych równolegle, konieczne jest opracowanie technologii ich łączenia przy użyciu specjalnych łączników – transpozycjonerów, które pozwolą na swobodne łączenie taśm pomiędzy warstwami.

Dotychczasowa analiza zjawisk zachodzących w uzwojeniach nadprzewodnikowych transformatorów energetycznych [10-13], rozważania teoretyczne, a także doświadczenie autorów w łączeniu taśm nadprzewodnikowych oraz wykonywaniu uzwojeń urządzeń nadprzewodnikowych [14-15] (elektromagnesy, transformatory, ograniczniki prądu zwarcia) prowadzi do hipotezy, że „przeplecenia taśm” można zrealizować poza zwojami uzwojeń w transpozycjonujących transpozycjonerach skupionych, uzyskując efekt jak w przewodzie Roebela. Idee transpozycjonowania taśm HTS połączonych równolegle przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Idea zastosowania transpozycjonerów (tp.) taśm HTS 2G (b – e) – połączonych równolegle, a – pojedyncza taśma HTS o prądzie krytycznym 100 A

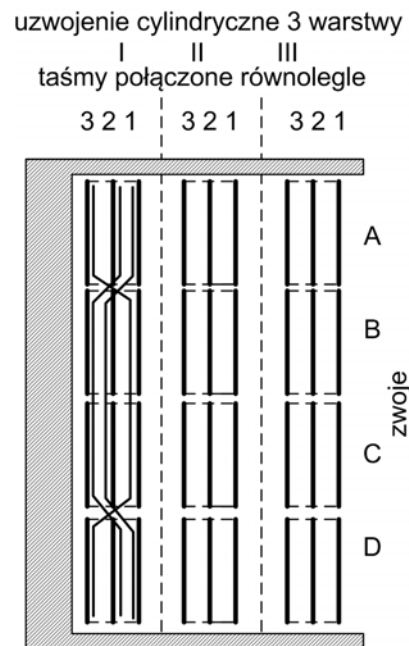
W przypadku uzwojeń cewkowych, ze względu na budowę uzwojenia, możliwe jest umieszczenia łączników w przestrzeni między uzwojeniami (rys. 8).



Rys. 8. Łączniki (transpozycjoner) umieszczone w przestrzeni pomiędzy uzwojeniami krążkowymi.

Na prezentowanym rysunku każda warstwa uzwojenia (I, II, III) nawinięta jest trzema taśmami połączonymi równolegle (1-3). Liczba i miejsce umieszczenia łączników zależy od parametrów, wymiarów i kształtu uzwojeń. Rozmiar i kształt łącznika oraz liczba „realizowanych” przepleceń zależy od miejsca jego umieszczenia oraz liczby taśm połączonych równolegle, a także ich szerokości (4 mm lub 12 mm) i wartości prądu krytycznego.

Dla uzwojeń cylindrycznym łączniki muszą przypominać rozwiązanie przedstawione na rys. 9.



Rys. 9. Idea transpozycji taśm w uzwojeniu cylindrycznym.

Na prezentowanym rysunku każda warstwa uzwojenia (I, II, III) nawinięta jest trzema taśmami połączonymi równolegle (1-3).

Wnioski

Zastosowanie transformatorów nadprzewodnikowych w systemie elektroenergetycznym daje wiele korzyści:

- eliminuje straty energii w uzwojeniach, które w transformatorach konwencjonalnych, przy kilkakrotnym transformowaniu wynoszą ponad 5% wytwarzanej na Ziemi energii elektrycznej,
- zastąpienie oleju mineralnego do chłodzenia uzwojeń ciekłym azotem eliminuje potencjalne zagrożenie dla środowiska naturalnego i poprawi bezpieczeństwo przeciwpożarowe.

Główną przyczyną małego zainteresowania transformatorami nadprzewodnikowymi jest wysoka cena w stosunku do transformatorów konwencjonalnych z uzwojeniami miedzianymi, chłodzonymi olejem mineralnym.

W dotychczasowych realizacjach transformatorów nadprzewodnikowych zastosowano na uzwojenia przewód o ciągłej transpozycji, który jest ponad 3 krotnie droższy od pakietu taśm równoległych z transpozycjonerami. Zastosowanie transpozycjonerów przyczyni się do znacznego obniżenia ceny transformatorów nadprzewodnikowych a przez to przyspieszy wzrost zainteresowania energetyki ich stosowaniem, co przyniesie wymienione wyżej korzyści.

Jednak wprowadzenie transpozycjonerów do budowy uzwojeń transformatorów nadprzewodnikowych musi być poprzedzone wnikliwą analizą i badaniami eksperymentalnymi zjawisk w uzwojeniach transformatorów nadprzewodnikowych, szczególnie sprzężeń magnetycznych między taśmami równoległymi i w przewodzie CTC oraz porównanie kosztów budowy transformatora z uzwojeniami nadprzewodnikowymi wykonanymi z taśm równoległych i CTC w zbudowanych w tym celu modelach fizycznych. Badania koncentrować się powinny na teoretycznej analizie zjawisk i mechanizmu rozptyłu prądów w równoległych taśmach nadprzewodnikowych oraz symulacjach numerycznych, a w dalszej kolejności na laboratoryjnych badaniach skuteczności wyrównywania reaktancji taśm równoległych na zbudowanych w tym celu modelach uzwojeń oraz funkcjonalnych modelach transpozycjonerów. Jeżeli wyniki tych badań będą pozytywne to umożliwią one opracowanie wytycznych i zbudowanie prototypów transpozycjonerów dla prądów wynikających z mocy i napięć systemu elektroenergetycznego.

Praca powstała w ramach realizacji projektu badawczego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju nr PBS1/A4/1/2012.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Janowski, dr inż. Grzegorz Wojtasiewicz, prof. dr hab. inż. Sławomir Kozak, dr inż. Janusz Kozak, dr inż. Michał Majka, mgr inż. Beata Kondratowicz-Kucewicz, Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie, Nadbystrzycka 36a, 20-618 Lublin, E-mail: g.wojtasiewicz@iel.waw.pl, t.janowski@pollub.pl, s.kozak@iel.waw.pl, j.kozak@iel.waw.pl, m.majka@iel.waw.pl, b.kondratowicz-kucewicz@iel.waw.pl

LITERATURA

- [1] Turowski J., Transformers – analysis, design and measurement, CRC Press, Boca Raton, London, New York 2013
- [2] Turowski J., Engineering Electrodynamics, CRC Press, Boca Raton, London, New York 2014
- [3] Swam S. Kalsi, High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment, Willey-IEEE Press, 2011
- [4] Jezierski E., Transformatory: Budowa i projektowanie. WNT 1965
- [5] Jezierski E., Transformatory. Podstawy teoretyczne, WNT 1965, Warszawa
- [6] Wojtasiewicz G., Janowski T., Kozak S., Kozak J., Majka M., Kondratowicz-Kucewicz B., Tests and Performance Analysis of 2G HTS Transformer, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 23, No 3, Article No: 5500505, 2013
- [7] Long N. J., Badcock R. A., Hamilton K., Wright A, Jiang Z., Lakshmi L. S., Development of YBCO Roebel cables for high current transport and low AC loss applications, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 234, Part 2, 2010 doi:10.1088/1742-6596/234/2/022021
- [8] Glasson N., Staines M., Buckley R., Pannu M., Kalsi S., Development of a 1 MVA 3-Phase Superconducting Transformer Using YBCO Roebel Cable, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 21, No 3, 2011, 1393-1396
- [9] Informacje producenta SuperPower Inc. – www.superpower-inc.com
- [10] Janowski T. et al.. Fault Current Limitation in Power Network by the Superconducting Transformers Made of 2G HTS, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, issue: 3, pp. 1413-1416, 2011
- [11] Wojtasiewicz G. et al., Experimental Investigation of the Model of Superconducting Transformer With the Windings Made of 2G HTS Tape, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, issue: 3, article no: 5500604, 2012
- [12] Wojtasiewicz G., Majka M., Kozak J., Badania eksperymentalne transformatora nadprzewodnikowego 10 kVA, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 NR 3/2014, s. 153-156
- [13] Jaroszyński L., Janowski T., YBCO coated conductors for superconducting transformer windings, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 NR 1/2014, s. 164-166
- [14] Zgłoszenie Patentowe Głowica grzejna lutownicy taśm zwłaszcza taśm nadprzewodnikowych (nr P.400436)
- [15] Zgłoszenie Patentowe Sposób lutowania miedzianych końcówek do taśmy nadprzewodnikowej (nr P.400536)