

Grzegorz WOJTASIEWICZ

TRANSPOZYCJA RÓWNOLEGLYCH TAŚM NADPRZEWODNIKOWYCH HTS 2G W UZWOJENIACH TRANSFORMATORÓW

STRESZCZENIE

W przypadku kiedy prąd znamionowy uzwojenia transformatora ma wartość większą od wartości prądu krytycznego użytej taśmy nadprzewodnikowej HTS 2G (drugiej generacji), zachodzi konieczność nawijania uzwojeń pakietem taśm połączonych równolegle. Konieczność stosowania taśm równoległych wpływa na zwiększenie grubości uzwojenia nadprzewodnikowego. Strumień rozproszenia przenikający uzwojenia jest niejednakowo skojarzony z poszczególnymi taśmami równoległymi, co powoduje przepływ prądów wyrównawczych. Powoduje to duże różnice w wartości prądu w poszczególnych warstwach równoległych i obniża pełne wykorzystanie taśm nadprzewodnikowych, a także wpływa na powstawanie strat dodatkowych w uzwojeniach. Aby temu zapobiec należy opracować metodę eliminacji prądów wyrównawczych w pakietach taśm równoległych uzwojeń transformatorów nadprzewodnikowych, lub znacznego ograniczenia ich wartości.

W artykule omówiono jeden z potencjalnych sposobów transpozycji równoległych taśm nadprzewodnikowych, opracowany w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie, wykorzystujący w tym celu mechaniczne łączniki – transpozycjonery, a także zalety i wady tej metody.

Słowa kluczowe: transformatory nadprzewodnikowe, taśmy nadprzewodnikowe HTS 2G, uzwojenia transformatorów, transpozycja taśm równoległych, transpozycjonery

1. WSTĘP

Uzwojenia nadprzewodnikowe silnopiędowych urządzeń elektroenergetycznych, takich jak transformatory, mają w stanie nadprzewodzącym zerową rezystancję, a straty

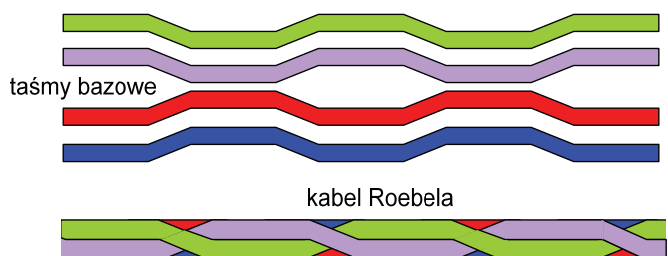
dr hab. inż. Grzegorz WOJTASIEWICZ

e-mail: g.wojtasiewicz@iel.pl

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki,
ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

prądowe podstawowe są praktycznie równe zero, jeżeli pominąć niewielkie straty od składowej promieniowej strumienia rozproszenia. W przypadku kiedy prąd znamionowy uzwojenia transformatora ma wartość większą od wartości prądu krytycznego użytej taśmy nadprzewodnikowej HTS 2G, zachodzi konieczność nawijania uzwojeń pakietem taśm połączonych równolegle. Strumień rozproszenia przenikający uzwojenia jest niejednakowo skojarzony z poszczególnymi taśmami równoległymi i powoduje przepływ dodatkowych prądów wyrównawczych [1]. Powoduje to duże różnice wartości prądu w poszczególnych warstwach równoległych i obniża pełne wykorzystanie taśm nadprzewodnikowych, a także powoduje powstawanie dodatkowych strat mocy w uzwojeniach. W transformatorach konwencjonalnych stosuje się pełną transpozycję miedzianych przewodów nawojowych w celu eliminacji tych prądów i tym samym ograniczenia strat mocy. Ze względu na mechaniczne parametry taśm nadprzewodnikowych HTS 2G, zwłaszcza stosunek szerokości i grubości taśmy do długości uzwojenia, wykonanie klasycznej transpozycji taśm nadprzewodnikowych nie jest możliwe.

Największe nadzieje na eliminację prądów wyrównawczych w przewodach równoległych, a tym samym na ograniczenie strat dodatkowych w uzwojeniach wiązane były z stosowaniem tzw. CTC (Continuously Transposed Cable) Roebel Cable czyli kabli Roebela o ciągłej transpozycji przewodu nadprzewodnikowego [2]. Idea tego kabla polega na odpowiednim ukształtowaniu (wycięciu) i złożeniu (zapleceniu) pakietu równoległych taśm nadprzewodnikowych, których liczba w kablu zależy od spodziewanej wartości prądu krytycznego kabla (rys. 1).



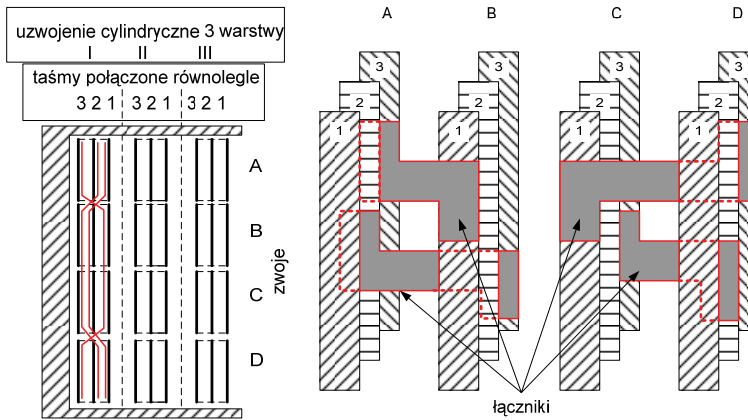
Rys. 1. Uproszczony schemat budowy kabla Roebela

Jednak ze względu na bardzo wysoki koszt wytworzenia kabla Roebela (duże straty w materiale nadprzewodzącym) jak i brak komercyjnie dostępnych kabli, transformatory z uzwojeniami nadprzewodnikowymi, zwłaszcza wykonanymi kablem Roebela, nie wyszły poza fazę projektów, a w przypadku transformatorów małej mocy – fazę modeli. Ten stan rzeczy potęgowała dodatkowo obawa środowiska przed stosowaniem wielu taśm równoległych bez transpozycji z obawy o zwiększenie strat w uzwojeniach, a tym samym zwiększenie i tak dużych na chwilę obecną kosztów chłodzenia.

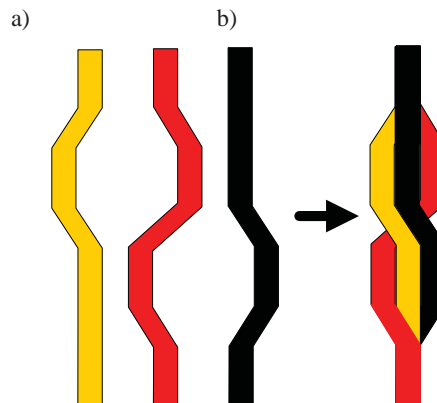
Żeby możliwa była transpozycja taśm nadprzewodnikowych HTS 2G, połączonych równolegle, w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych prowadzono badania nad technologią użycia specjalnych łączników – transpozycjonerów, które pozwoliły by na swobodną zmianę kolejności taśm równoległych pomiędzy warstwami.

2. TRANSPOZYCJA TAŚM RÓWNOLEGLYCH – – TRANSPOZYCJONERY

W przypadku uzwojeń cylindrycznych (śrubowych) łączniki muszą przypominać rozwiązanie przedstawione na rys. 2. Uzwojenie składające się z trzech warstw (I – III) i czterech zwojów w warstwie (A – D), nawinięte jest trzema taśmami równoległymi (1 – 3). W każdej z warstw należałoby umieścić łączniki sprzęgające elektrycznie odpowiednie taśmy równoległe aby uzyskać ciągłą ich transpozycję. Łączniki takie mogłyby przyjąć formę specjalnie ukształtowanych, elastycznych, wzajemnie izolowanych elementów miedzianych wzorowanych na strukturze Kabla Roebela (rys. 3a), które po złożeniu (rys. 3b), zmieniałyby kolejność taśm równoległych na wejściu i wyjściu łącznika.

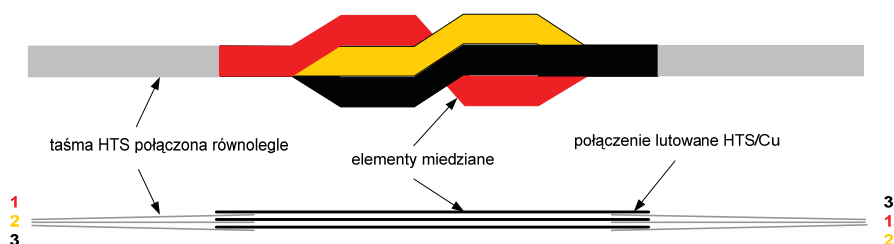


Rys. 2. Przykładowy schemat uzwojenia cylindrycznego oraz idea łączników realizujących transpozycje taśm równoległych



Rys. 3. Łączniki uzwojeń cylindrycznych:
a) elementy składowe, b) łącznik po złożeniu

Dzięki swojej elastyczności, mogłyby być one „nawijane” razem z taśmami równoległymi i w ten sposób pozwoliłyby w prosty sposób na wielokrotną zmianę kolejności taśm nadprzewodnikowych w całej strukturze uzwojenia (rys. 4), jednak posiadają dwie wady, które w zasadzie wykluczają zastosowanie takiego rozwiązania w przypadku uzwojeń nadprzewodnikowych.



Rys. 4. Realizacji transpozycji taśm nadprzewodnikowych z wykorzystaniem łącznika

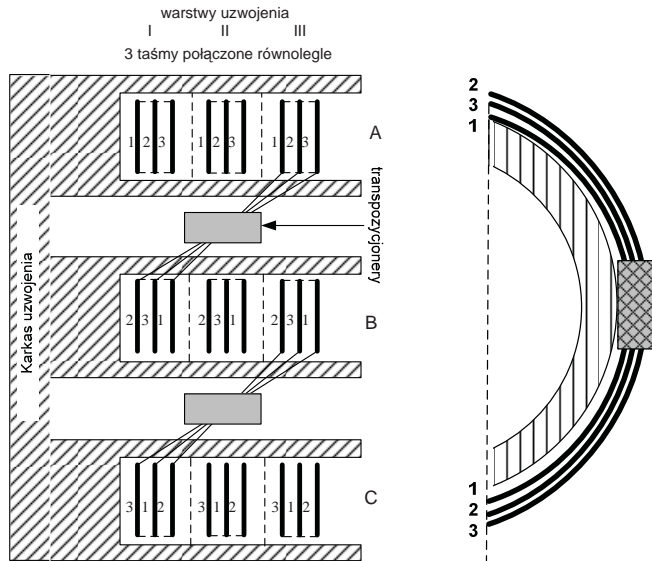
Po pierwsze rozwiązanie takie wymaga pewnego i wytrzymałego połączenia taśm nadprzewodnikowych z elementami miedzianymi na wejściu i wyjściu łącznika (rys. 4). Warunki te spełnia połączenie lutowane. Jednak nawet przy najlepiej wykonanym połączeniu lutowanym w miejscu połączenia zawsze występują straty wynikające z rezystancji połączeń, które mogą spowodować lokalne podgrzanie nadprzewodnika i wyjście ze stanu nadprzewodnictwa, co z kolei prowadzi do wydzielania dużej energii w tym miejscu i trwałego uszkodzenia taśmy nadprzewodnikowej. Dlatego też należy dążyć do maksymalnego ograniczenia liczby takich połączeń. Z drugiej strony połączenie śrubowe lub zaciskane nie wchodzi w rachubę ze względu na konieczność umieszczenia łącznika w strukturze uzwojenia.

Po drugie w rozwiązaniu tym łącznik miedziany, będący elementem aktywnym, byłby swojego rodzaju „grzałką”. Umieszczenie wielu takich elementów w strukturze uzwojenia nadprzewodnikowego uniemożliwiłoby pracę transformatora ponieważ przepływ prądu generowałby straty „podgrzewające” uzwojenie w całej objętości, powodując jego niekontrolowane wyjście ze stanu nadprzewodzącego.

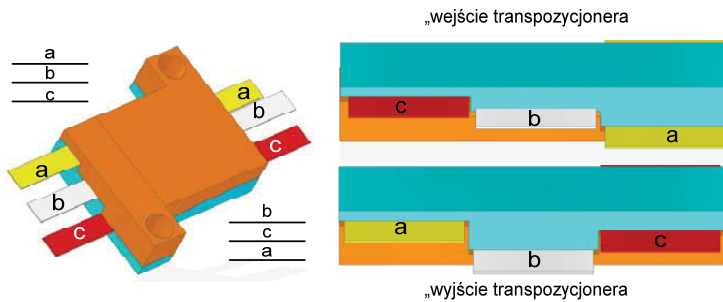
W przypadku uzwojeń krążkowych można rozważyć możliwość umieszczenia łączników w przestrzeni między uzwojeniami (rys. 5). Uzwojenie składa się z trzech cewek (A – C) i trzech warstw w cewce (I – III), wykonanych trzema taśmami równoległymi (1 – 3). W przestrzeni pomiędzy kolejnymi cewkami umieszczony jest łącznik – transpozycjoner, pozwalający na transpozycję w sposób ciągły taśm równoległych na przejściu pakietu taśm z ostatniej warstwy cewki „wyższej” na pierwszą warstwę cewki „niższej”.

Odpowiednio ukształtowany transpozycjoner, umieszczony poza strukturą uzwojenia pozwala na mechaniczną zmianę kolejności taśm równoległych w pakiecie bez ingerencji w ciągłość taśmy nadprzewodnikowej, tj. bez konieczności jej przecięcia i ponownego łączenia (rys. 6).

Transpozycjoner taki składa się z dwóch odpowiednio ukształtowanych części: górnej i dolnej, które po złożeniu zmieniają wyjściowe położenie umieszczonych pomiędzy nimi taśm nadprzewodnikowych względem położenia wejściowego. Zmiana położenia taśm w transpozycjonerze przekłada się na zmianę kolejności taśm równoległych w pakiecie.

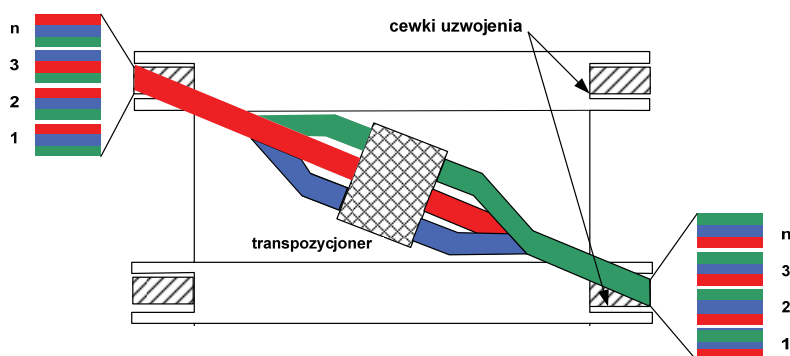


Rys. 5. Przykładowy schemat uzwojenia krążkowego oraz idea łączników realizujących transpozycje taśm równoległych



Rys. 6. Transpozycja taśm nadprzewodnikowych w transpozycjonerze mechanicznym

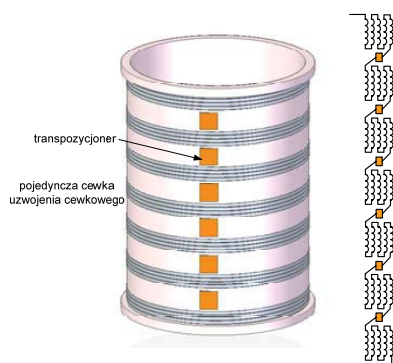
Rysunek 7 przedstawia w sposób uproszczony schemat transpozycji taśm równoległych uzwojenia cewkowego przy użyciu transpozycjonera. Każda cewka uzwojenia składa się z „n” warstw wykonanych pakietem trzech taśm równoległych. Pomiedzy dwoma częściami transpozycjonera umieszczone są „rozłożone” na płask (bok do boku) taśmy z pakietu. Ponieważ pozycja indywidualnych taśm HTS na wyjściu transpozycjonera jest inna niż na jego wejściu zatem po ponownym „złożeniu” taśm ich kolejność w pakiecie ulega zmianie. Pozycja taśm w pakiecie zależy o ukształtowania powierzchni obu pasujących do siebie i stykających się części transpozycjonera. Ze względu na konieczność rozłożenia taśm wymagane jest zapewnienie odpowiedniego odstępu pomiędzy cewkami.



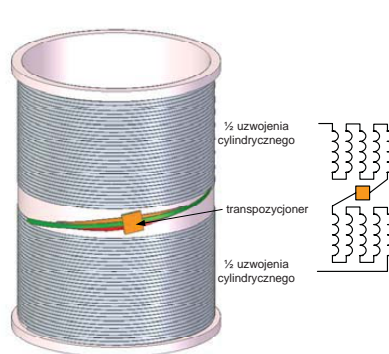
Rys. 7. Sposób realizacji transpozycji taśm równoległych w transpozycjonerze

Takiego rodzaju łącznik jest elementem pasywnym. Nie bierze udziału w przewodzeniu prądu, a więc nie jest źródłem dodatkowych strat mocy i nie wpływa na pracę uzwojenia nadprzewodnikowego. Umieszczenie transpozycjonera w przestrzeni pomiędzy cewkami uzwojenia nie wpływa na strukturę pojedynczej cewki uzwojenia, a transpozycji można dokonać zachowując ciągłość taśmy nadprzewodnikowej. Liczba przepleceń możliwych do wykonania zależy od liczby zastosowanych transpozycjonerów i jest mniejsza o jeden od liczby sekcji uzwojenia. W przypadku uzwojenia składającego się np. z siedmiu cewek (rys. 8), możliwa jest tylko sześciokrotna transpozycja taśmą w całym uzwojeniu.

Transpozycja taśm równoległych przy użyciu transpozycjonerów możliwa jest również w uzwojeniu cylindrycznym. Jeżeli uzwojenie cylindryczne podzielimy na dwie części o takiej samej liczbie zwojów, a w przestrzeni pomiędzy obydwoimi częściami umieścimy transpozycjoner (rys. 9), to uzyskamy pojedynczą transpozycję taśm równoległych w środku uzwojenia.



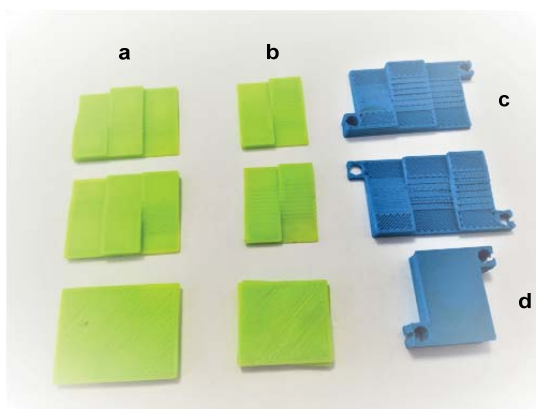
Rys. 8. Uzwojenie cewkowe z sześciokrotną transpozycją taśmą równoległą



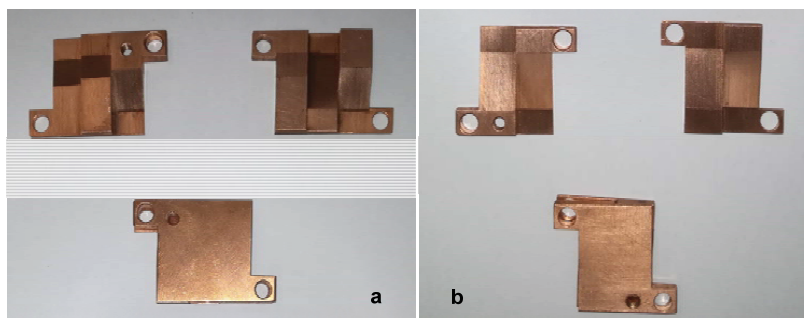
Rys. 9. Transpozycja taśm równoległych w uzwojeniu cylindrycznym

3. BUDOWA UZWOJEŃ TRANSFORMATORA NADPRZEWODNIOWEGO Z WYKORZYSTANIEM TRANSPOZYCJONERA TAŚM RÓWNOLEGLYCH

W ramach badań prowadzonych w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych zaprojektowano i wykonano transpozycjonery dla uzwojeń transformatora nawiniętych pakietem dwóch lub trzech taśm równoległych [3–4]. Rysunek 10 przedstawia pierwsze prototypy transpozycjonierów wykonane techniką druku w 3D, natomiast rysunek 11 docelowe transpozycjonery wykonane z miedzi.



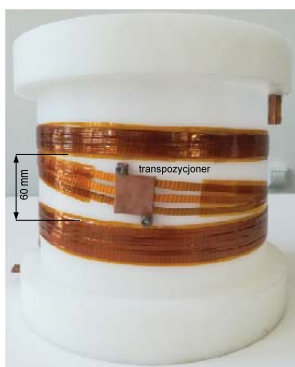
Rys. 10. Transpozycjonery wykonane techniką druku 3D: a) 3 taśmy / 4 mm, b) 2 taśmy / 4 mm, c) 3 taśmy / 12 mm, d) 2 taśmy / 12 mm



Rys. 11. Transpozycjonery Cu: a) 3 taśmy / 4 mm, b) 2 taśmy / 12 mm

Powierzchnie wewnętrzne obu części transpozycjonera zostały wymodelowane w taki sposób aby w jak najmniejszym stopniu wpływać na kształt i strukturę umieszczonej pomiędzy nimi taśmy HTS, przy jednoczesnym wyraźnym zróżnicowaniu położenia taśm na wejściu i wyjściu transpozycjonera. Szerokość transpozycjonera zależy od liczby taśm HTS 2G w pakiecie równoległym oraz ich szerokości. Jakość wykonania elementów miedzianych jest znacznie wyższa niż elementów z drukarki 3D. Jednak samo ich wykonanie, ze względu na wymiary, jest technologicznie utrudnione i z tego względu pracochłonne. Zastosowanie transpozycjonerów miedzianych wymaga izolowania umieszczonych w nim taśm HTS. Z drugiej strony elementy miedziane, będące bardzo dobrymi przewodnikami ciepła, mogą uczestniczyć w procesie chłodzenia uzwojeń nadprzewodnikowych podczas chłodzenia metodą kontaktową. W tym celu można połączyć je odpowiednimi mostkami cieplnymi z głowicą chłodzącą kriochłodziarki kontaktowej.

W celu sprawdzenia możliwości praktycznego zastosowania transpozycjonerów został wykonany w Pracowni prosty model transpozycji taśm równoległych uzwojenia transformatora. Uzwojenie cylindryczne zostało nawinięte pakietem 3 wzajemnie izolowanych taśm równoległych o szerokości 6 mm typu SCS6050-AP, o prądzie krytycznym 150 A, na specjalnie w tym celu zaprojektowanym i wykonanym karkasie. Uzwojenie podzielone jest na dwie części: „górną” o szerokości 35 mm składającą się z 4 zwojów i „dolną” o szerokości 40 mm składającą się z 5 zwojów. Izolacja międzyzwojowa i wzmocnienie wykonane zostały samoprzylepną izolacją kaptonową o szerokości 12 mm i grubości 0,05 mm. W przestrzeni pomiędzy obydwoma częściami uzwojenia umieszczony jest transpozycjoner (rys. 12)

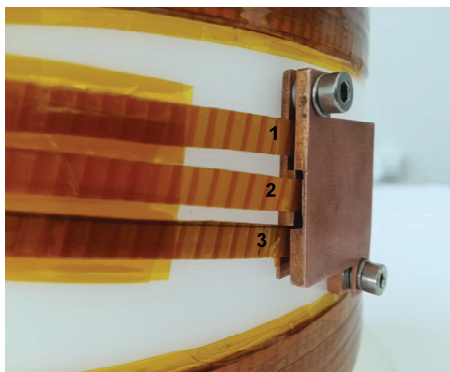


Rys. 12. Sposób umieszczenia transpozycjonera

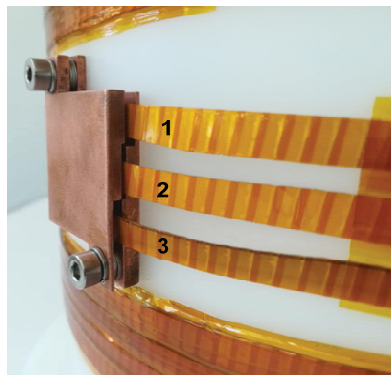


Rys. 13. Taśmy rozłożone na płask przed i po transpozycji

Wartość odstepu pomiędzy częściami uzwojenia zależy oczywiście od szerokości transpozycjonera ale także od wymaganej przestrzeni, niezbędnej do rozłożenia taśm z pakietu na płask przed dokonaniem transpozycji oraz ponownego ich złożenia w pakiet po transpozycji (rys. 13). Po rozłożeniu na płask taśm równoległych umieszcza się je pomiędzy górną i dolną częścią transpozycjonera, dzięki czemu uzyskuje się zmianę kolejności taśm na jego wejściu i wyjściu (rys. 14 i rys. 15).



Rys. 14. Pozycja taśm na wejściu transpozycjonera



Rys. 15. Pozycja taśm na wyjściu transpozycjonera

Przed transpozycją kolejność taśm w pakiecie równoległym była następująca: na wierzchu znajdowała się taśma nr 2, w środku taśma nr 1, a na spodzie taśma nr 3. Kolejność tą odzwierciedla przestrzenne rozłożenie taśm na wejściu transpozycjonera (rys. 14). Na wyjściu transpozycjonera przestrzenne rozłożenie taśm ulega zmianie. Taśma nr 1 przemieszcza na spód, taśma nr 2 na środek, a taśma nr 3 na wierzch. W takiej kolejności taśmy zostają ponownie złożone w pakiet równoległy, i tym samym zostaje dokonana transpozycja (rys. 15).

Po wykonaniu modelu transpozycji taśm równoległych i przeprowadzeniu próby w ciekłym azocie, mającej na celu sprawdzenie wpływu naprężeń cieplnych na wytrzymałość mechaniczną uzwojenia i transpozycjonera, można sformułować następujące wnioski:

1. Zaproponowana metoda nawijania uzwojenia pozwala na wykonanie transpozycji taśm równoległych w transpozycjonerze. Krzywizna karkasu w znacznym stopniu ułatwia „rozkładanie” i ponowne „składanie” pakietu taśm równoległych na wejściu i wyjściu transformatora. Jednak aby podczas transpozycji taśm nie dochodziło do ich zginania, skręcania lub nadmiernego rozciągania, skutkujących powstawaniem naprężeń w taśmie, długość taśm na przejściu pomiędzy obydwoma częściami uzwojenia powinna zawierać się w granicach $1/3 \div 1/2$ obwodu karkasu.
2. Szerokość odstępu pomiędzy częściami uzwojenia zależy od szerokości transpozycjonera oraz długości przejścia taśm pomiędzy nimi. Szerokość transpozycjonera zależy od ilości przeplatanych taśm i ich szerokości. Również czym dłuższe przejście taśm tym odstęp większy.

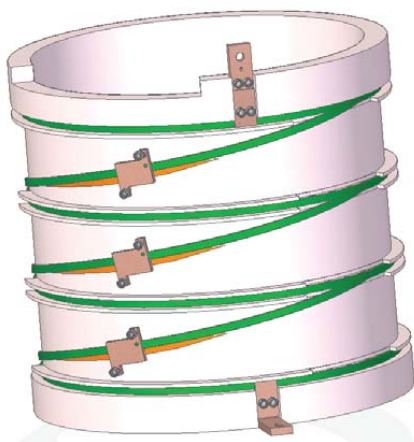
Powyższy model odpowiada transpozycji taśm równoległym w uzwojeniu cylindrycznym przedstawionym na rysunku 8.

W przypadku uzwojeń cewkowych (ale również i cylindrycznych) wykonanie transpozycji można ułatwić poprzez specjalną konstrukcję karkasu z wyznaczonymi miejscami na uzwojenia i przestrzenią na umieszczenie transpozycjonera i wykonanie transpozycji. Rysunek 16 przedstawia model karkasu uzwojeń cewkowych, umożliwiającą wykonanie 4 cewek w przygotowanych do tego miejscach.

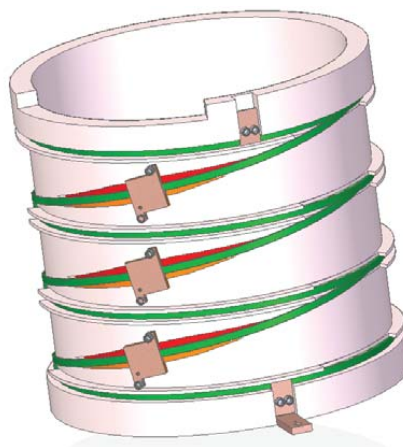


Rys. 16. Karkas dla modelu uzwojeń cewkowych

W przestrzeni pomiędzy cewkami można umieścić trzy transpozycjonery do transpozycji zarówno dwóch (rys. 17) jak i trzech (rys. 18) taśm równoległych.



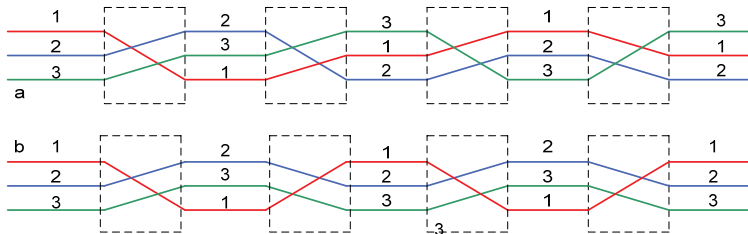
Rys. 17. Model uzwojenia cewkowego nawiniętego dwoma taśmami równoległymi



Rys. 18. Model uzwojenia cewkowego nawiniętego trzema taśmami równoległymi

Nawijanie poszczególnych cewek i transpozycje taśm wykonuje się podobnie jak w przypadku uzwojenia cylindrycznego ze szczególnym uwzględnieniem eksperymentalnie określonej długości przejścia taśm pomiędzy cewkami. Liczba możliwych do wykonania transpozycji w całym uzwojeniu cewkowym jest równa liczbie użytych transpozycjonerów i jest o jeden mniejsza od liczby cewek uzwojenia. Możliwa jest

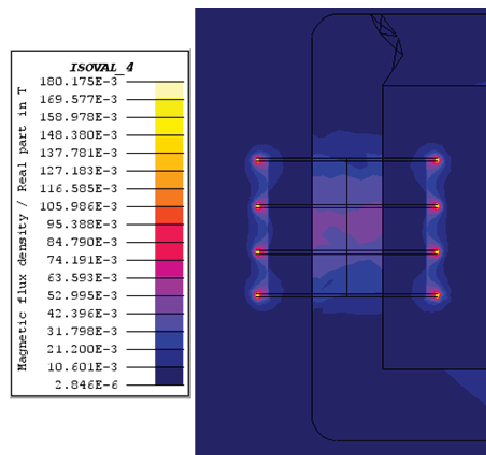
zmiana kolejności taśm równoległych w pakiecie na wyjściu każdego z transpozycjonerów (rys. 19a), lub powrót do kolejności początkowej co drugi przeplot (rys. 19b).



Rys. 19. Transpozycja taśm nadprzewodnikowych:

- a) ciągła zmiana kolejności taśm równoległych na wyjściu transpozycjonera,
- b) powrót do początkowej kolejności taśm równoległych co drugi przeplot

Modułowa budowa uzwojenia cewkowego pozwala na dokładanie w miarę potrzeby kolejnych cewek uzwojenia i kolejnych transpozycjonerów. Jednak ze względu na konieczność zachowania odpowiednich odstępów pomiędzy cewkami, uzwojenie takie przy wielu cewkach staje się bardzo wysokie. Poza tym ponieważ odstęp pomiędzy cewkami jest niekiedy wielokrotnie większy od szerokości pojedynczej cewki uzwojenia (rys. 8 i 16), rozkład pola magnetycznego w takim uzwojeniu jest bardzo niejednorodny, co może przełożyć się na wzrost przemiennoprądowych strat histerezowych w uzwojeniu. Przykład na rysunku 20 przedstawia niejednorodność rozkładu indukcji magnetycznej, w uzwojeniu cewkowym modelu numerycznego transformatora nadprzewodnikowego 50 kVA, uzyskany w ramach realizacji projektu badawczego UMO-2014/15/B/ST8/04685.



Rys. 20. Rozkład indukcji magnetycznej w uzwojeniu DN transformatora HTS 50 KVA: liczba cewek uzwojenia – 4, szerokość cewki 12 mm, odstęp pomiędzy cewkami 55 mm

W przypadku uzwojenia cylindrycznego z jednym przeplotem odstęp pomiędzy sekcjami uzwojenia jest znacznie mniejszy od ich szerokości. Niejednorodność pola magnetycznego występuje tylko w środku uzwojenia, a wzrost składowej promieniowej pola magnetycznego w bardzo niewielkim stopniu wpływa na wartość prądowych strat histerezy w całym uzwojeniu. Podobne zależności występują, np. w uzwojeniach transformatorów regulacyjnych gdzie stosowane się rozrzedzenie zwojów w środku uzwojenia.

5. PODSUMOWANIE

Jeżeli zachodzi konieczność nawinięcia uzwojeń transformatora nadprzewodnikowego 2 lub 3 taśmami równoległymi, jak ma to miejsce w przypadku uzwojeń DN transformatorów małych i średnich mocy, możliwe jest wykonanie transpozycji taśm HTS 2G w zaproponowanych transpozycjonerach mechanicznych. Jednak bardzo niejednorodny rozkład pola magnetycznego w przestrzeniach międzycewkowych uzwojeń cewkowych, wynikający z konieczności zapewnienia odpowiedniego odstępu pomiędzy cewkami na wykonanie transpozycji, w zasadzie wyklucza stosowanie jakichkolwiek transpozycjonerów mechanicznych w tego typu uzwojeniach nadprzewodnikowych. Z tego względu jedynym realnym sposobem wykorzystania zaproponowanych transpozycjonerów jest wykonanie pojedynczej transpozycji 2 lub 3 taśm równoległych w środku podzielonego uzwojenia cylindrycznego.

Z drugiej strony, w świetle badań prowadzonych w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych, konieczność stosowania transpozycji równoległych taśm HTS 2G staje się problematyczna [5]. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że nawet przy większej liczbie taśm równoległych (5-8) suma prądu pojedynczej taśmy i prądu wyrównawczego nie przekracza wartości dopuszczalnej 70% prądu krytycznego taśmy HTS 2G (70% I_c), a współczynniki start dodatkowych w uzwojeniach nadprzewodnikowych są pomijalnie małe. Z tego powodu transpozycja nadprzewodnikowych taśm równoległych okazuje się zbędna.

Dostępne obecnie taśmy HTS 2G o szerokości 12 mm i prądzie krytycznym 250 – 500 A [5], w temperaturze ciekłego azotu (77 K), pozwalają na zmniejszenie liczby taśm równoległych w pakiecie, a nawet na nawijanie uzwojeń transformatorów pojedynczą taśmą nadprzewodnikową, co całkowicie eliminuje problem transpozycji.

LITERATURA

1. Jezierski E.: Transformatory: Budowa i projektowanie, WNT, Warszawa 1965.
2. Badcock, R. A., Long, N. J., Mulholland, M., Hellmann, S., Wright, A., Hamilton, K. A.: Progress in the manufacture of long length YBCO Roebel cables. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19(3), 2009, 3244-3247.
3. Kondratowicz-Kucewicz, B., Wojtasiewicz, G.: The Proposal of a Transformer Model With Winding Made of Parallel 2G HTS Tapes With Transpositioners and its Contact Cooling System, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 28(4), 5500405, 2018.

4. Wojtasiewicz, G., Kozak, S.: The New Concept of Using the Superconducting Transformers in Low-and Medium-Voltage Distribution Network, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 28(4), 5500305, 2018.
5. Janowski T., Wojtasiewicz G.: Equalizing current in the windings of 2G HTS transformer with parallel tapes transposed with clusters of transpositioners, materiały konferencji Elmeco, IEEE Xplore®.
6. <https://www.amsuper.com>

Przyjęto do druku dn. 19.03.2020 r.

TRANSPOSITION OF THE PARALLEL SUPERCONDUCTING HTS 2G TAPES IN THE WINDINGS OF THE TRANSFORMERS

Grzegorz WOJTASIEWICZ

SUMMARY *In a case where rated current of the windings are higher than the critical current of the used superconducting HTS 2G (second generation) tape, the windings are made of a package of tapes connected in parallel. The necessity to use tapes connected in parallel leads to an increase of the thickness of the windings. The leakage flux permeating the winding is unequally associated with individual parallel tapes and causes equalization currents to flow. This current causes large differences in the values of total current in individual parallel layers and thus reduces the full use of superconducting tapes, as well as affects the generation of additional losses in the windings. To prevent this, a method for equalizing equalization currents in the parallel tapes of the superconducting transformer windings should be developed.*

This article discusses one of the potential ways of transposition parallel superconducting tapes, developed at the Laboratory of Superconductor Technologies in Lublin, using mechanical connectors – transpositioners, as well as the advantages and disadvantages of this method.

Keywords: *superconducting transformers, superconducting HTS 2G tapes, transformers windings, transposition of the parallel tapes, transpositioners*



Dr hab. inż. Grzegorz WOJTASIEWICZ ukończył jednolite studia w Politechnice Lubelskiej na kierunku Elektrotechnika uzyskując tytuł magistra inżyniera w 1998 r. W 1999 r. rozpoczął pracę w Zakładzie Badań Podstawowych Instytutu Elektrotechniki w Warszawie w Pracowni Krioelektromagnesów z siedzibą w Lublinie, która w 2004 r. została przekształcona w Samodzielną Pracownię Technologii Nadprzewodnikowych, a następnie w 2005 r. w Pracownię Technologii Nadprzewodnikowych w ramach Zakładu Wielkich Mocy IEL. Dr hab. inż. Grzegorz Wojtasiewicz od początku pracy w Instytucie zajmował się zastosowaniami technologii nadprzewodnikowych i nadprzewodników wysokotemperaturowych w urządzeniach elektroenergetycznych. Obecnie zajmuje się problematyką transformatorów nadprzewodnikowych. Podczas swojej pracy współuczestniczył w realizacji dziesięciu projektów badawczych, w tym dwóch trwających. Jest autorem i współautorem 79 artykułów, w tym 38 indeksowanych w bazie JCR. Uczestniczył w 30 konferencjach międzynarodowych i krajowych, w tym kilkakrotnie w konferencjach: European Conferences on Applied Superconductivity – EUCAS, Applied Superconductivity Conference – ASC oraz Magnet Technology – MT. W latach 2006 – 2007 przebywał w Szwajcarii, gdzie pracował w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych – CERN w Genewie.