

Modelowanie numeryczne przewodów złożonych z nadprzewodników wysokotemperaturowych

Streszczenie. Ze względu na swoje zalety, w szczególności duży prąd krytyczny i duże krytyczne pole magnetyczne, taśmy typu Rare-Earth Barium Copper Oxide (REBCO) są jednymi z najbardziej obiecujących nadprzewodników wysokotemperaturowych. Uzyskiwany rozkład pola magnetycznego dla bardziej złożonych struktur, takich jak na przykład przewodów zbudowanych z taśm nadprzewodzących, może być symulowany numerycznie na podstawie pomiarów laboratoryjnych. W pracy przedstawiono metodykę takich symulacji: od pomiarów pojedynczej próbki do symulacji złożonych struktur nadprzewodzących.

Abstract. Rare Earth Copper Oxide (REBCO) tapes are one of the most promising high temperature (HTS) superconductors due to their advantages such as high critical current and high critical magnetic field. Magnetic field distribution of complex structures, for example cables composed of abovementioned tapes, can be numerically modeled based upon laboratory measurement results. This article presents step-by-step the method of modeling of complex structures. (**Numerical modeling of cables composed of high temperature superconducting tapes.**)

Słowa kluczowe: Taśmy REBCO, symulacje numeryczne, pomiary prądu krytycznego, nadprzewodniki wysokotemperaturowe
Keywords: REBCO tapes, numerical modelling, critical current measurement, high temperature superconductors

Wstęp

Nadprzewodniki stosowane są w wielu aplikacjach, pracując zarówno w temperaturze ciekłego helu (4.2 K) jak i ciekłego azotu (77 K) [1]. Dobrze rozwinięty proces skraplania, nieograniczone zasoby i dostęp jak i intensywnie rozwijana kriogenika, szczególnie w zakresie temperatur od 15 K do 30 K, czyni ciekły azot popularnym i tanim czynnikiem chłodzącym w systemach nadprzewodzących. W przeciwieństwie do azotu, hel w postaci gazowej jest gazem rzadkim w środowisku, co czyni go znacznie droższym. Pomimo stosowania zamkniętego obiegu, cena instalacji kriogenicznej wykorzystującej hel jest kilkunastokrotnie wyższa od urządzeń wykorzystujących ciekły azot.

Znaczący postęp w rozwoju nadprzewodników nastąpił w 1986 roku dzięki odkryciu przez J. G. Bednorza i K. A. Mullera nadprzewodników wysokotemperaturowych (ang. *High-temperature superconductor*, HTS) [2]. To odkrycie pozwoliło przesunąć temperaturę krytyczną nadprzewodnika powyżej temperatury wrzenia ciekłego azotu (LN₂). Obecnie, większość aplikacji korzysta z nadprzewodników niskotemperaturowych (ang. *Low-temperature superconductor*, LTS). Zastosowania te obejmują przede wszystkim aparaturę do obrazowania metodą rezonansu magnetycznego (ang. *Magnetic Resonance Imaging*, MRI) [3], spektroskopii atomowej (ang. *Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, NMR) [4] cewki nadprzewodzące generujące duże pole magnetyczne stosowane np. w Wielkim Zderzaczach Hadronów [5], w procesach fuzji jądrowej [6] i nadprzewodnikowym magazynowaniu energii (ang. *Superconducting Magnetic Energy Storage*, SMES) [7].

Ze względu na swoje zalety HTS, szczególnie w postaci taśm nadprzewodzących (ang. *Coated Conductors*), są brane pod uwagę w przyszłych zastosowaniach takich jak akceleratory cząstek [5]. Innym z zastosowań mogą być nadprzewodzące bezstratne sieci energetyczne, zawierające przewody wykonane z taśm HTS. Obecnie funkcjonuje kilka prototypów takich sieci m. in. w USA, Korei, Japonii, Rosji i Holandii [8]. Jedną z sieci funkcjonujących komercyjnie jest projekt AmpaCity w Essen (Niemcy) [9]. Jednym z ważnych współczesnych zastosowań HTS w nowoczesnych projektach są nadprzewodzące transformatory [10] i ograniczniki prądu [11].

Do najpopularniejszych HTS zaliczane są taśmy nadprzewodzące wykonane z RE-Ba₂Cu₃O₇ (REBCO), gdzie RE to skrót od ziem rzadkich (ang. *Rare Earth*), takich jak ittr lub gadolin (odpowiednio YBCO lub GdBCO). Taśmy nadprzewodzące REBCO mają grubość rzędu kilkudziesięciu μm, z czego sam nadprzewodnik charakteryzuje się grubością równą około 1 μm [13]. Ze względu na ich zalety takie jak: bardzo wysoka gęstość prądu krytycznego (definiowanego jako prąd dla którego spadek napięcia wzdłuż taśmy wynosi 1 μV/cm) [14], płaski kształt, możliwość tworzenia sztucznych centrów pinningu (ang. *Artificial Pinning Centers*, APC) pozwalających na ograniczenie anizotropii, materiały na bazie REBCO są jednymi z najbardziej obiecujących nadprzewodników wysokotemperaturowych.

Jedną z głównych wad taśm REBCO jest przede wszystkim ich skomplikowana budowa wielowarstwowa, wspierająca właściwą warstwę nadprzewodnika [14-18]. Dodatkowo występuje wysoka anizotropia, definiowana jako zależność prądu krytycznego od natężenia i kierunku zewnętrznego pola magnetycznego [19]. Ze względu na skomplikowany proces produkcji istnieje konieczność definiowania charakterystyki prądu krytycznego I_c w funkcji natężenia pola magnetycznego B i kąta pomiędzy wektorem pola magnetycznego a prostopadłą do pola powierzchni taśmy α . System pomiarowy musi być wyposażony w kriostat. Pole magnetyczne powinno być i jednorodne i o regulowanej wartości. Takie pole może być wytwarzane na przykład za pomocą cewek Helmholtza lub magnesów trwałych w konfiguracji Hallbacha [20]. Pomiary mogą być wykonywane nieprzerwanie dla całej taśmy [21] lub dla pojedynczych próbek [22]. Drugie z rozwiązań zmniejsza koszty i upraszcza system pomiarowy.

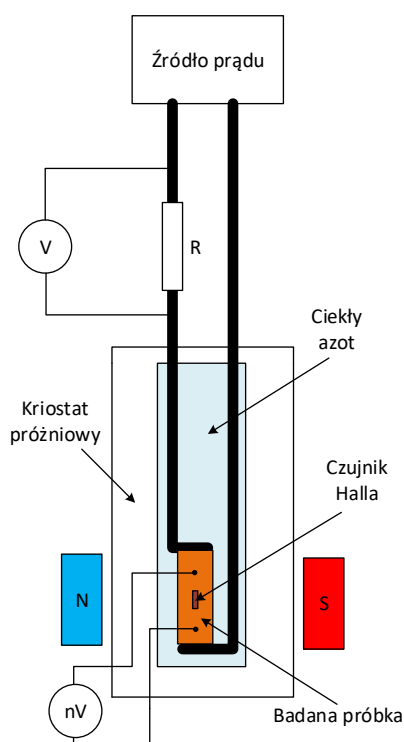
W niniejszym artykule zostały wykonane pomiary próbek o długości 8 cm i szerokości 12 mm firmy SuperPower [23]. Otrzymana charakterystyka $I_c(B, \alpha)$ posłużyła jako dane wejściowe do analizy numerycznej trzech różnych typów przewodów zbudowanych z taśm nadprzewodzących. Symulacje przeprowadzono za pomocą oprogramowania COMSOL Multiphysics [24].

Struktura taśmy

Do badań wybrano taśmę nadprzewodzącą firmy SuperPower o szerokości 12 mm. Taśma posiada strukturę wielowarstwową, której rdzeniem jest podłoże (ang. *substrate*) wykonany ze stali Hastelloy o grubości około 50 μm . Na podłożu znajduje się kilka warstw buforujących (ang. *buffer layers*), zapewniających wymaganą gładkość powierzchni dla głównej warstwy typu REBCO oraz zapobiegają reakcjom chemicznym pomiędzy nadprzewodnikiem a podłożem. Dwie dodatkowe warstwy: pierwsza wykonana ze srebra oraz kolejna, wykonana z miedzi o grubości oraz 20 μm , zapewniają stabilizację elektryczną i termiczną. Długość badanej próbki była równa 8 cm.

Wyniki pomiarowe

System pomiarowy został przedstawiony na Rys. 1.



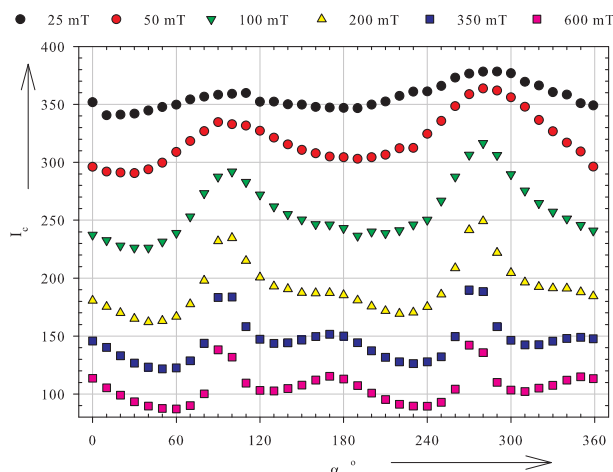
Rys.1. Uproszczony schemat systemu pomiarowego wykorzystanego do badań próbki REBCO. Opracowano na podstawie [25].

Układ pomiarowy zawiera kriostat wypełniony ciekłym azotem, do którego wkładana jest próbka taśmy przykręcona do przewodów doprowadzających prąd. Jako źródło prądowe wykorzystano regulowany laboratoryjny zasilacz prądu stałego. Spadek napięcia na próbce mierzony jest za pomocą nanowoltomierza. Zewnętrzne pole magnetyczne może zostać doprowadzone albo z magnesów trwałych albo z elektromagnesu, a jego wartość indukcji mierzona jest za pomocą czujnika Halla. Kierunek pola magnetycznego zmieniający jest poprzez obracanie magnesów trwałych wokół kriostatu. Prąd mierzono poprzez pomiar spadku napięcia na boczniku rezystancyjnym.

Prąd krytyczny w funkcji kierunku pola magnetycznego dla taśmy SuperPower został zmierzony dla pola magnetycznego o wartości (25, 50, 100, 200, 350 i 600) mT w temperaturze 77 K. Wyniki przedstawiono na Rys. 2.

Otrzymane charakterystyki prądu krytycznego wykazują silną anizotropię taśmy, i to niezależnie od wartości zewnętrznego pola magnetycznego. Dla kierunków o kącie zbliżonym do kierunku równoległego do powierzchni taśmy

(90 i 270 stopni), prąd krytyczny osiąga maksymalną wartość podczas gdy dla kierunków zbliżonych do kierunku prostopadłego do powierzchni taśmy (0 i 180 stopni) osiąga wartości minimalne. Kształt charakterystyki ulega zmianie wraz ze zmianą wartości pola magnetycznego ze względu na APC. Powoduje to również przesunięcie minimum w około 150 stopni (25 mT) do około 120 stopni (600 mT). Prąd krytyczny maleje wraz ze wzrostem amplitudy pola magnetycznego. Dla maksimów od około 380 A (25 mT, 270 stopni) do około 140 A (600 mT, 270 stopni). Charakterystyki $I_c(B, \alpha)$ otrzymane w badaniach laboratoryjnych posłużyły w dalszej części artykułu do opracowania danych wejściowych do symulacji przewodów.



Rys.2. Wyniki pomiaru zależności kątowej prądu krytycznego od zewnętrznego pola magnetycznego.

Techniki numeryczne

Wykorzystanie zmierzonych wielkości jako parametrów wejściowych w symulacjach numerycznych wymaga znajomości charakterystyki $J_c(B_{loc}, \alpha)$, gdzie J_c jest gęstością prądu krytycznego, α jest kątem jaki tworzy wektor natężenia pola magnetycznego do powierzchni taśmy, a B_{loc} jest gęstością lokalnego strumienia pola magnetycznego, w którym umieszczony jest nadprzewodnik. Istnieje możliwość wyznaczenia wspomnianej charakterystyki na podstawie zmierzonej charakterystyki $I_c(B, \alpha)$. Jest to realizowane poprzez usunięcie wpływu pola własnego, indukowanego przez prąd płynący w nadprzewodniku. Eliminacja pola własnego może zostać dokonana metodą obliczeń wieloparametrycznych, metodą brute-force [26], Nelder-Mead [27] lub MMA [28]. Niestety metody te są czasochłonne. Innym sposobem jest metoda bezparametryczna opisana w [29], która jest mniej czasochłonna i w pełni automatyczna. Metoda ta pozwala na otrzymanie charakterystyki $J_c(B_{loc}, \alpha)$ w kilku krokach numerycznych i z dużą dokładnością.

Rezultaty obliczeń prądu krytycznego przewodów wielotaśmowych

Jako przykład poprzednio opisanej techniki numerycznej, zostały wykonane symulacje wybranych przewodów wielotaśmowych z taśmami HTS. Symulacje te umożliwiły obliczenie prądów krytycznych w funkcji amplitudy i kierunku pola magnetycznego. Do badań wybrano przewody to prosty przewód typu Stack [30], Roebel cable [31] i Cable-in-Conduit [32]. Aby umożliwić porównanie ww. przewodów założono, że przewody składają się maksymalnie z 10 taśm o szerokości 12 mm. Ostatecznie do badań zakwalifikowano:

- 10-warstwowy przewód o szerokości 12 mm (*stack cable*),
- Roebel cable złożony z 2 x 10 warstw, 5,5 mm szerokości każda, ze szczeliną o długości 0,5 mm [31]
- Cable-in-Conduit, 5 x 6 warstw, 4 mm szerokości każda, wymiary przyjęto na podstawie [32]

W celu uproszczenia symulacji 3D do 2D dla przewodu typu Roebel, koniecznym było wzięcie pod uwagę relacji pomiędzy polem elektrycznym i prądem krytycznym. Metodę tą, opisaną w [33], wykorzystano w symulacjach numerycznych. Ze względu na długość transpozycji (ang. *transposition length*), oznaczającą odległość po której pojedyncza taśma przewodu kończy swój okres o zygzakowatym kształcie (*zig-zag*), prąd krytyczny może być definiowany według kryteriów opisanych w [33] Pierwsze z nich (oznaczane jako „Roebel AVG”) definiuje I_c jako prąd dla którego średni spadek napięcia na jednostkę długości przyjmuje krytyczną wartość E_c (100 $\mu\text{V/m}$). Drugie kryterium (oznaczane jako „Roebel MAX”), definiuje prąd krytyczny I_c jako prąd dla którego spadek napięcia na jednostkę długości osiąga maksymalną wartość w co najmniej jednej taśmie.

Najwyższa wartość prądu krytycznego przy indukcji pola magnetycznego równej 25 mT (2330 A) została otrzymana dla przewodu typu Cable-in-Conduit. Ten prąd jest około 8.9% większy niż dla przewodu typu Stack, dla którego jego maksymalna wartość prądu krytycznego jest równa 2140 A dla tego samego pola magnetycznego. Różnica ta jest istotna. Co więcej, ze względu na bloki taśm obrócone w przewodzie Cable-in-Conduit o około 72 stopnie, przewód ten wykazuje pewną izotropowość prądu krytycznego względem kierunku pola magnetycznego, w tym również dla większych wartości pola. Dodatkowo podział na większą ilość bloków, obróconych o mniejszy kąt, może spowodować dalsze zmniejszenie anizotropii. Biorąc wszystkie wyżej wymienione cechy pod uwagę, przewód typu Cable-in-Conduit wydaje się być najlepszym spośród zbadanych kabli. Jest to zaletą zwłaszcza w przypadku przesyłu prądu stałego, gdzie występuje oddziaływanie zewnętrznego pola magnetycznego o zmiennym kierunku.

Jak wspomniano, przewód typu Stack posiada mniejszy prąd krytyczny dla małego pola magnetycznego niż przewód typu Cable-in-Conduit. Z drugiej jednak strony, dla większego pola magnetycznego (powyżej 100 mT) i dla określonych kątów, istnieje możliwość otrzymania prądu krytycznego większego niż dla przewodów typu Cable-in-Conduit. Jest to szczególnie użyteczne dla zastosowań, w których występuje duże zewnętrzne pole magnetyczne o stałym kierunku. Dodatkową zaletą przewodu typu Stack jest jego płaski kształt, co przyczynia się do zmniejszenia objętości oraz upraszcza proces produkcji.

Przewód typu Roebel charakteryzuje się najniższym prądem krytycznym dla wszystkich kierunków i amplitud pola magnetycznego. Dla dużej wartości pola magnetycznego przewód ten może się charakteryzować większym prądem krytycznym niż dla przewodu typu Cable-in-Conduit. Podobne właściwości posiada przewód typu Stack. Po części może być to związane z mniejszą ilością taśm nadprzewodzącej, co spowodowane jest szczeliną występującą w tym typie przewodu. Co więcej, dla pola magnetycznego o wartości do 50 mT, przewód ten charakteryzuje się największą różnicą pomiędzy największymi i najmniejszymi wartościami prądu krytycznego. Z drugiej strony jest to specjalny przewód, umożliwiający redukcję strat przewodzenia prądu przemiennego. Wspomniany wcześniej zygzakowaty kształt struktury przyczynia się do dalszej redukcji prądów wirowych. Warto podkreślić, iż przewód typu Roebel

charakteryzuje się większą wartością prądu krytycznego dla większych wartości pola magnetycznego (powyżej 100 mT) o kierunku zbliżonym do prostopadłego do powierzchni przewodu (około 0 i 180 stopni).

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano metodę wyznaczania charakterystyk kątowych prądu krytycznego złożonych struktur nadprzewodzących, zbudowanych z taśm HTS. Dodatkowo, została przedstawiona metoda bezparametryczna, służąca tworzeniu charakterystyki $J_c(B_{loc}, \alpha)$, używanej jako wejściowej w symulacjach numerycznych taśm HTS. Głównym celem przedstawionej pracy było pokazanie sposobu przeprowadzenia symulacji złożonych, niejednokrotnie kosztownych struktur, na podstawie pomiarów laboratoryjnych pojedynczych, relatywnie tanich próbek. Jako przykład w artykule przedstawiono porównanie przewodów wykonanych z taśm nadprzewodzących, w szczególności przewodów typu Stack, Roebel i Cable-in-Conduit.

Z przeprowadzonych badań wynika, że przewody typu Cable-in-Conduit umożliwiają zwiększenie prądu krytycznego o około 8.9% w badanym przypadku. Ten typ przewodu umożliwia rozwiązanie problemu anizotropii. Niestety, jego produkcja tego typu przewodu jest bardziej złożona, a sam przewód charakteryzuje się większymi gabarytami niż pozostałe przewody przedstawione w artykule. Dla zastosowań, w których kąt pomiędzy wektorem pola magnetycznego, a przewodem jest stały, przewody typu Stack i Roebel są lepszym zastosowaniem, w szczególności dla dużych wartości zewnętrznego pola magnetycznego.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Kubiczek, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: krzysztof.kubiczek@polsl.pl

Prof. dr hab. Inż. Marian Kampik, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: marian.kampik@polsl.pl

LITERATURA

1. C. Buzea and K. Robbie, "Assembling the puzzle of superconducting elements: a review", *Superconductor Science and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. R1-R8, 2004.
2. J. Bednorz and K. Muller, "Possible high T superconductivity in the Ba-La-Cu-O system", *Zeitschrift fur Physik B Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.
3. R. Withers, G. Liang, B. Cole and M. Johansson, "Thin-film HTS probe coils for magnetic-resonance imaging", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 3, no. 1, pp. 2450-2453, 1993.
4. D. Live and S. Chan, "Bulk susceptibility corrections in nuclear magnetic resonance experiments using superconducting solenoids", *Analytical Chemistry*, vol. 42, no. 7, pp. 791-792, 1970.
5. "European Organization for Nuclear Research (CERN) official page," 2017. [Online]. Available: <https://home.cern/about>
6. "International Thermonuclear Experimental Reactor official page", *ITER*, 2017. [Online]. Available: <https://www.iter.org>.
7. W. Buckles and W. Hassenzahl, "Superconducting magnetic energy storage", *IEEE Power Engineering Review*, vol. 20, no. 5, pp. 16-20, 2000.
8. T. Arndt, J. Grundmann, A. Kuhnert, P. Kummeth, W. Nick, M. Oomen, C. Schacherer and W. Schmidt, "Aspects on HTS applications in confined power grids", *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 12, p. 124010, 2014.
9. "The Ampacity Project", *TDWorld*, 2017. [Online]. Available: <http://www.tdworld.com/overhead-distribution/ampacity-project>.
10. Jianxun Jin and Xiaoyuan Chen, "Development of HTS transformers", *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008.

11. E. Leung, "Superconducting fault current limiters", *IEEE Power Engineering Review*, vol. 20, no. 8, pp. 15-18, 30, 2000.
12. C. Senatore, M. Alessandrini, A. Lucarelli, R. Tediosi, D. Uglietti and Y. Iwasa, "Progresses and challenges in the development of high-field solenoidal magnets based on RE123 coated conductors", *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 10, p. 103001, 2014.
13. L. Goodrich and F. Fickett, "Critical current measurements: A compendium of experimental results", *Cryogenics*, vol. 22, no. 5, pp. 225-241, 1982.
14. M. Rupich, W. Zhang, X. Li, T. Kodenkandath, D. Verebelyi, U. Schoop, C. Thieme, M. Teplitsky, J. Lynch, N. Nguyen, E. Siegal, J. Scudiere, V. Maroni, K. Venkataraman, D. Miller and T. Holesinger, "Progress on MOD/RABITSTM 2G HTS wire", *Physica C: Superconductivity*, vol. 412-414, pp. 877-884, 2004.
15. F. Radpour, R. Singh, S. Sinha, P. Chou, N. Hsu and M. Rahmati, "ChemInform Abstract: Metal Organic Chemical Vapor Deposition of High-Temperature Superconducting Y-Ba-Cu-O Films", *ChemInform*, vol. 21, no. 42, 1990.
16. M. Igarashi, K. Kakimoto, S. Hanyu, C. Tashita, T. Hayashida, Y. Hanada, S. Fujita, K. Morita, N. Nakamura, Y. Sutoh, H. Kutami, Y. Iijima and T. Saitoh, "Remarkable progress in fabricating RE123 coated conductors by IBAD/PLD technique at Fujikura", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 234, no. 2, p. 022016, 2010.
17. J. Lee, H. Lee, J. Lee, S. Choi, S. Yoo and S. Moon, "RCE-DR, a novel process for coated conductor fabrication with high performance", *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 4, p. 044018, 2014.
18. R. Bhattacharya, Y. Qiao and V. Selvamanickam, "Electrodeposited Cu-Stabilization Layer for High-Temperature Superconducting Coated Conductors", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 24, no. 1-2, pp. 1021-1026, 2010.
19. D. Uglietti, H. Kitaguchi, Seyong Choi and T. Kiyoshi, "Angular Dependence of Critical Current in Coated Conductors at 4.2 K and Magnet Design", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 2909-2912, 2009.
20. M. Stępień, B. Grzesik, "FEM modelling of levitation forces between bulk superconductor and Halbach PM array", 2015 Joint UK-Japan Workshop on Physics and Applications of Superconductivity, April 12th-15th, 2015, Cambridge, UK.
21. L. Rossi, X. Hu, F. Kametani, D. Abraimov, A. Polyanskii, J. Jaroszynski and D. Larbalestier, "Sample and length-dependent variability of 77 and 4.2 K properties in nominally identical RE123 coated conductors", *Superconductor Science and Technology*, vol. 29, no. 5, p. 054006, 2016.
22. N. Amaro, J. Šouc, M. Vojenčiak, J. Pina, J. Martins, J. Ceballos and F. Gömöry, "AC Losses and Material Degradation Effects in a Superconducting Tape for SMES Applications", *Technological Innovation for Collective Awareness Systems*, pp. 417-424, 2014.
23. Home Page | SuperPower", *Superpower-inc.com*, 2017. [Online]. Available: <http://www.superpower-inc.com/>.
24. COMSOL Multiphysics® Modeling Software", *Comsol.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/>.
25. K. Kubiczek, M. Stępień, M. Kampik, "Characterization of High-Temperature Superconducting Tapes". In writing, 2018.
26. F. Grilli, F. Sirois, V. Zermeno and M. Vojenciak, "Self-Consistent Modeling of the Ic of HTS Devices: How Accurate do Models Really Need to Be?", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 6, pp. 1-8, 2014.
27. J. Nelder and R. Mead, "A Simplex Method for Function Minimization", 2017.
28. K. Svanberg, "The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization", 2017.
29. V. Zermeno, K. Habelok, M. Stępień and F. Grilli, "A parameter-free method to extract the superconductor's Jc(B,θ) field-dependence from in-field current-voltage characteristics of high temperature superconductor tapes", 2017.
30. J. Clem, J. Claassen and Y. Mawatari, "AC losses in a finiteZstack using an anisotropic homogeneous-medium approximation", *Superconductor Science and Technology*, vol. 20, no. 12, pp. 1130-1139, 2007.
31. W. Goldacker, F. Grilli, E. Pardo, A. Kario, S. Schlachter and M. Vojenčiak, "Roebel cables from REBCO coated conductors: a one-century-old concept for the superconductivity of the future", *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 9, p. 093001, 2014.
32. G. Celentano, G. De Marzi, F. Fabbri, L. Muzzi, G. Tomassetti, A. Anemona, S. Chiarelli, M. Seri, A. Bragagni and A. della Corte, "Design of an Industrially Feasible Twisted-Stack HTS Cable-in-Conduit Conductor for Fusion Application", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 3, pp. 1-5, 2014.
33. V. Zermeno, F. Sirois, M. Takayasu, M. Vojenciak, A. Kario and F. Grilli, "A self-consistent model for estimating the critical current of superconducting devices", *Superconductor Science and Technology*, vol. 28, no. 8, p. 085004, 2015.