

Sławomir KOZAK  
Michał MAJKA  
Janusz KOZAK

## WPŁYW TEMPERATURY NA PRACĘ NADPRZEWODNIKOWEGO OGRANICZNIKA PRĄDU DLA SIECI ŚREDNICH NAPIĘĆ

**STRESZCZENIE** *Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu dla sieci średniego napięcia chłodzony z wykorzystaniem kriochłodziarki, sfinansowany przez NFOŚiGW oraz NCBiR, w ramach projektu: GEKON2/O2/267193/13/2015, testowany był w Instytucie Elektrotechniki. Do budowy tego ogranicznika wykorzystana została wysokotemperaturowa taśma nadprzewodnikowa II generacji – SF12100. W tym ograniczniku istnieje możliwość zmiany roboczej temperatury pracy. Przeanalizowana została praca ogranicznika w trzech temperaturach: 72 K, 80 K i 86 K, w których dokonane zostały eksperymentalne próby zwarcia oraz niższych temperaturach: 38 K, 51 K, 66 K i w temperaturze ciekłego azotu: 77,4 K. Można zwiększyć wielokrotnie prąd roboczy poprzez obniżenie temperatury pracy ogranicznika. Dla temperatur początkowych powyżej 51 K maksymalna temperatura taśmy nadprzewodnikowej w chwili wyłączenia prądu zwarcia przez zewnętrzny wyłącznik ( $t = 0,08$  s) nie przekracza 290 K. Dla temperatur powyżej 51 K w przypadku badanego ogranicznika można rozważyć zwiększenie czasu ograniczania prądu. Wydłużenie czasu pracy ogranicznika zwiększy maksymalną temperaturę taśmy nadprzewodnikowej i wydłuży czas schładzania ogranicznika po ograniczeniu zwarcia.*

**Słowa kluczowe:** *nadprzewodnikowy ogranicznik prądu, SFCL, wysokotemperaturowa taśma nadprzewodnikowa II generacji, HTS*

---

**prof. dr hab. inż. Sławomir KOZAK, dr hab. inż. Michał MAJKA,  
dr hab. inż. Janusz KOZAK**  
e-mail: [s.kozak; m.majka j.kozak]@pollub.pl

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki  
i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, ISSN-0032-6216, LXVI, zeszyt 281, 2020

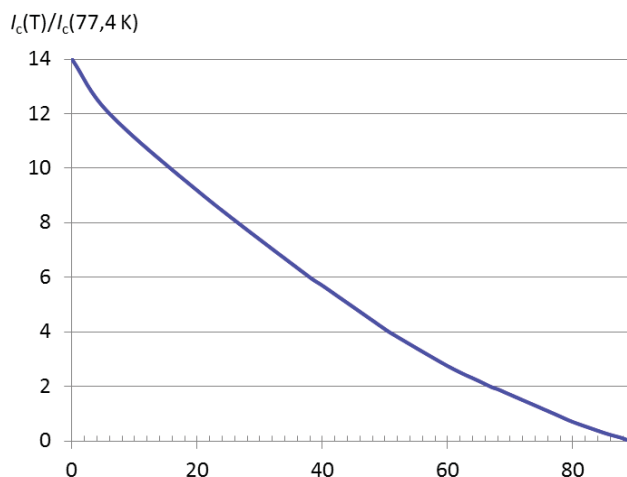
## 1. WSTĘP

W 2017 roku testowany był w Instytucie Elektrotechniki zaprojektowany i zbudowany, z udziałem autorów, nadprzewodnikowy ogranicznik prądu (superconducting fault current limiter – SFCL) dla sieci średniego napięcia chłodzony z wykorzystaniem kriochłodziarki, sfinansowany przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w ramach projektu: GEKON2/O2/267193/13/2015.

Do budowy tego ogranicznika wykorzystana została wysokotemperaturowa taśma nadprzewodnikowa II generacji – SF12100. W odróżnieniu do poprzednich ograniczników dla sieci średniego napięcia budowanych i badanych w Instytucie Elektrotechniki przez autorów [1 – 4], w których stosowany był system chłodzenia w kąpeli ciekłego azotu, ze stałą temperaturą roboczą ogranicznika 77,4 K (temperatura przed zwarciem) oraz inna wysokotemperaturowa taśma nadprzewodnikowa II generacji – SF12050, w tym ograniczniku istnieje możliwość zmiany roboczej temperatury pracy. Podczas projektowania ogranicznika przyjęto jego nazwę jako „6 kV/0,14 K” zgodnie z jego planowanymi parametrami elektrycznymi dla temperatury pracy 77,4 K. W tym ograniczniku prąd przepływa przez dwie równoległe połączone taśmy SF12100 o długości 66 m każda.

Przeanalizowana została praca ogranicznika w trzech temperaturach: 72 K, 80 K i 86 K, w których dokonane zostały eksperymentalne próby zwarciovowe oraz niższych temperaturach: 38 K, 51 K, 66 K i dodatkowo w temperaturze ciekłego azotu: 77,4 K.

Jedną z bazowych temperatur w nadprzewodnictwie jest temperatura ciekłego azotu: 77,4 K, dla której podawane są np. parametry taśm wykonanych z nadprzewodników



**Rys. 1. Krotność prądu krytycznego w odniesieniu do prądu krytycznego w temperaturze 77,4 K dla taśmy SF12100 w funkcji temperatury**

wysokotemperaturowych (HTS – high temperature superconductor). Zmiana temperatury zmienia parametry taśmy HTS. Na rysunku 1 przedstawiona została zależność prądu krytycznego taśmy SF12100 od temperatury [5 – 8]. Wybór temperatur 38 K, 51 K i 66 K do analizy pracy ogranicznika wynikał z krotności prądu krytycznego. Obniżenie temperatury z 77,4 K do 66 K zwiększa dwukrotnie prąd krytyczny taśmy SF12100. Obniżenie temperatury do 51 K zwiększa czterokrotnie prąd krytyczny taśmy SF12100 (w odniesieniu do 77,4 K). Obniżenie temperatury z 77,4 K do 38 K zwiększa sześciokrotnie prąd krytyczny taśmy SF12100.

## 2. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

W modelu numerycznym ogranicznika odwzorowany został układ zwarcioowy z badań w Zwarciowni Instytutu Elektrotechniki. Prąd ograniczany był przez czas 0,08 s, następnie układ zwarcioowy był rozłączany przez zewnętrzny wyłącznik. W modelu numerycznym w czasie od 0 s do 0,08 s płynie prąd zwarcioowy. Po tym czasie, już bez przepływu prądu, ogranicznik podlega procesowi schładzania przez czas 2,92 s.

### 2.1. Przebiegi prądu zwarcioowego

Prąd został ograniczony w obwodzie zwarciowym w pierwszej próbie w temperaturze pracy 72 K z ok. 80 kA (bez ogranicznika) do maksymalnie 1,9 kA. W drugiej próbie zwarciowej, która przeprowadzona została w temperaturze pracy 80 K prąd został ograniczony z ok. 80 kA do ok. 1 kA. Trzecia próba przeprowadzona została w temperaturze 86 K a maksymalny prąd ograniczony był zbliżony do prądu w drugiej próbie zwarciowej. Po trzeciej próbie temperatura ogranicznika wzrosła do temperatury powyżej temperatury krytycznej (89 K) taśmy nadprzewodnikowej SF12100.

Przebiegi prądu podczas ograniczania zwarcia zależą w dużym stopniu od początkowej temperatury ogranicznika jak to zostało przedstawione na rysunkach 2a i 2b. Im niższa temperatura początkowa, tym większy prąd maksymalny. Prąd maksymalny rośnie ze wzrostem prądu krytycznego wraz z obniżaniem temperatury z 80 K do 40 K. Dla temperatur powyżej 80 K maksymalny prąd zwarcioowy utrzymuje się w pobliżu wartości 1 kA, niezależnie od malejącego prądu krytycznego (rys. 3).

Prąd znamionowy ogranicznika rośnie wraz z obniżaniem temperatury proporcjonalnie do wzrostu prądu krytycznego zgodnie z zależnością (1):

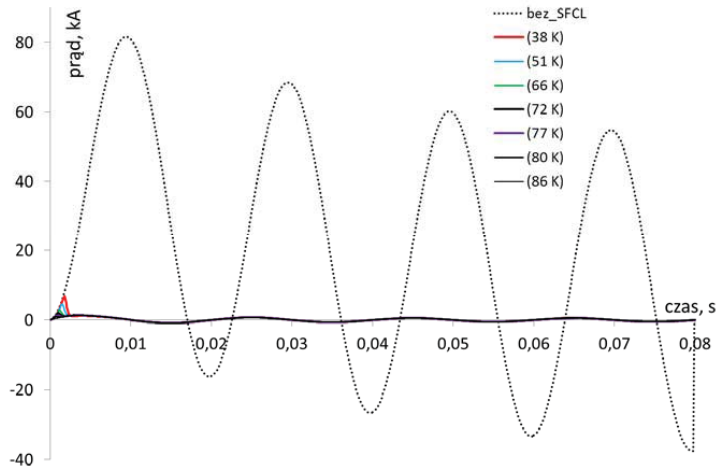
$$I_r = I_c / 3\sqrt{2} \quad (1)$$

gdzie:

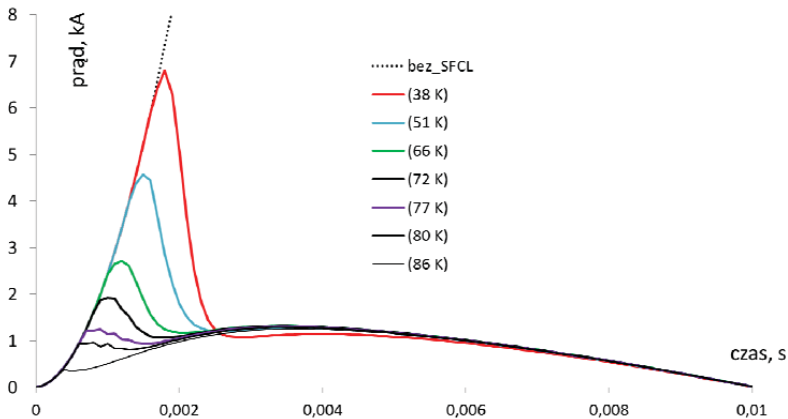
- $I_r$  – prąd znamionowy SFCL (wartość skuteczna),
- $I_c$  – prąd krytyczny SFCL.

Liczba  $\sqrt{2}$  wynika z faktu, że  $I_c$  należy traktować jako wartość maksymalną a  $I_T$  jako wartość skuteczną w sinusoidalnym przebiegu prądu. Liczba 3 wynika z przyjętej krotności prądu przeciążeniowego. Ogranicznik powinien zadziałać dopiero po przekroczeniu wartości prądu przeciążeniowego. Zwiększenie prądu krytycznego poprzez obniżenie temperatury, zwiększa proporcjonalnie zarówno prąd znamionowy ogranicznika jak i wartość prądu przeciążeniowego po przekroczeniu którego ogranicznik rozpoczyna działanie.

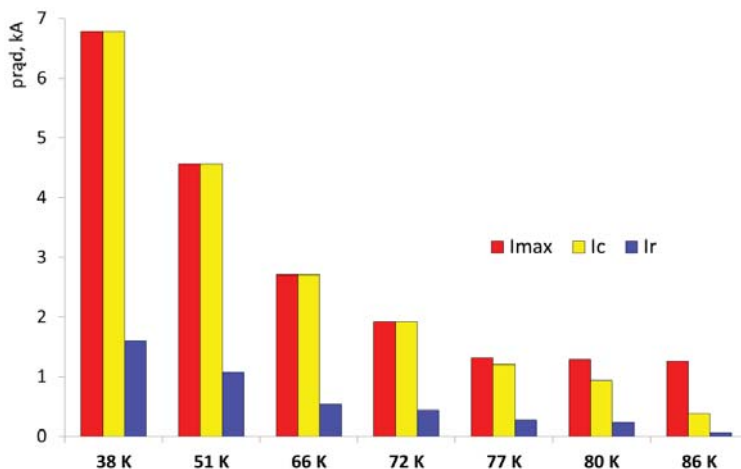
a)



b)



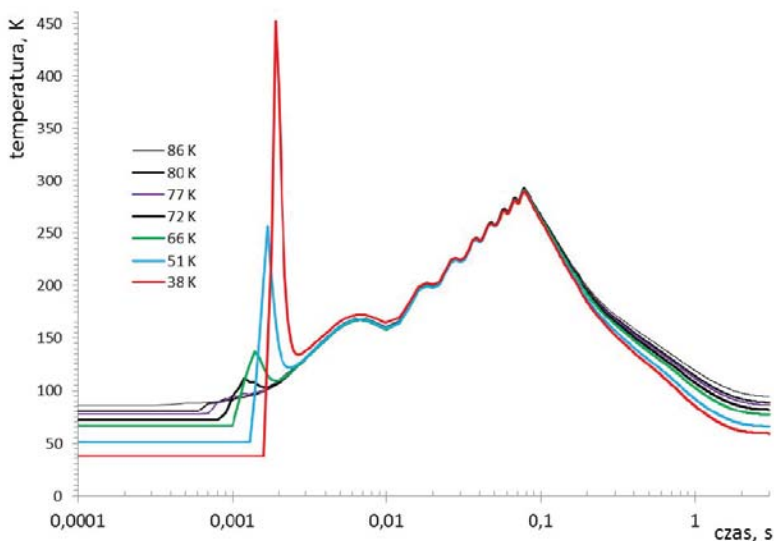
Rys. 2. Prądy w obwodzie zwarciovym z umieszczonym w nim ogranicznikiem (SFCL) schłodzonym do różnych temperatur oraz w obwodzie bez ogranicznika (bez\_SFCL)



Rys. 3. Prąd maksymalny  $I_{max}$ , prąd krytyczny  $I_c$ , prąd znamionowy  $I_r$  w ograniczniku w zależności od temperatury roboczej (przed zwarciem)

## 2.2. Przebiegi zmian temperatury taśmy HTS

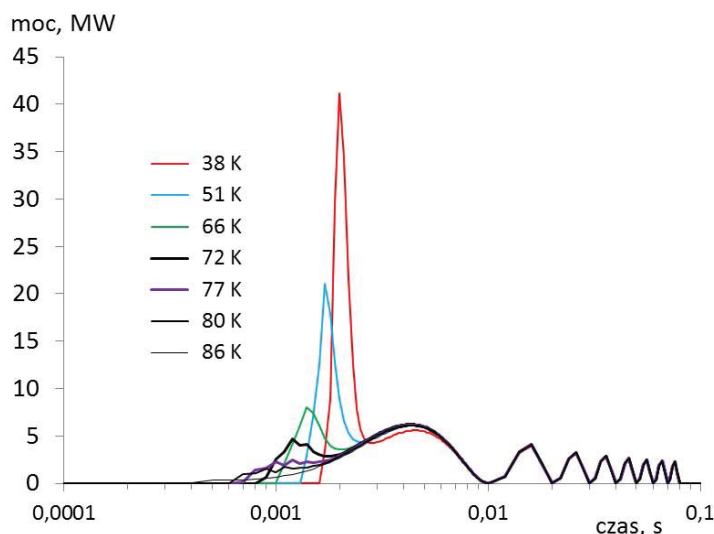
Na rysunku 4 przedstawione zostały przebiegi zmian temperatury taśmy HTS ogranicznika podczas zwarcia (0 s – 0,08 s) oraz schładzania (0,08 s – 3 s) w funkcji temperatury początkowej ogranicznika przed zwarciem.



Rys. 4. Przebiegi zmian temperatury taśmy HTS ogranicznika podczas zwarcia (0 s – 0,08 s) oraz schładzania (0,08 s – 3 s) w funkcji temperatury początkowej ogranicznika przed zwarciem

Obniżenie temperatury początkowej ma nieznaczny wpływ na maksymalną temperaturę taśmy HTS po czasie 0,08 s (koniec ograniczania zwarcia). Jednak dla temperatur 51 K i 38 K pojawia się znaczący, chwilowy wzrost temperatury taśmy w czasie pomiędzy 0,001 s a 0,003 s. W przypadku temperatury 51 K ten chwilowy wzrost temperatury nie przekracza temperatury maksymalnej po 0,08 s. W przypadku temperatury 38 K chwilowy wzrost temperatury (0,001 s – 0,003 s) już znacząco przekracza maksymalną temperaturę po zwarcia (0,08 s). Wzrost temperatury taśmy HTS w czasie od 0,001 s do 0,003 s wynika ze znacznego wzrostu mocy generowanej w taśmie HTS w przypadku temperatur 66 K, 51 K i 38 K (rys. 5).

Z punktu widzenia działania ogranicznika prądu bardzo istotna jest maksymalna temperatura, do jakiej nagrzana zostanie taśma HTS podczas zwarcia. Przekroczenie temperatury 450 K, w przypadku taśmy SF12100 jest niedopuszczalne i grozi trwałym uszkodzeniem ogranicznika. W przypadku temperatury początkowej 38 K maksymalna temperatura przekroczyła 450 K i praca ogranicznika w tej temperaturze początkowej i niższych grozi trwałym uszkodzeniem ogranicznika.

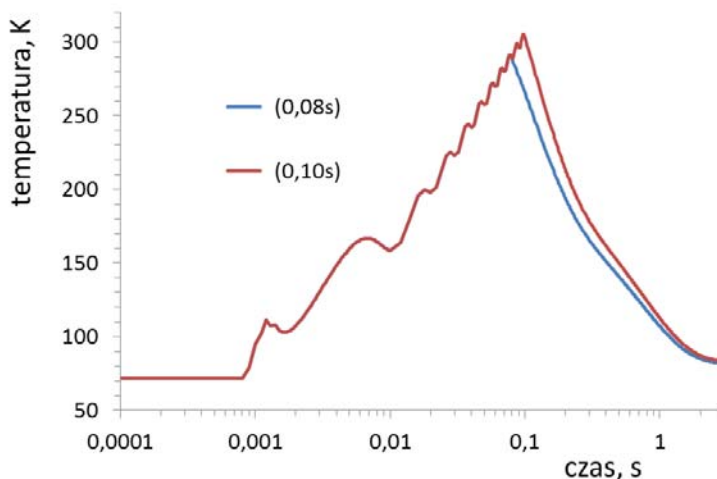


**Rys. 5.** Przebiegi zmian mocy generowanej w taśmie HTS ogranicznika podczas zwarcia (0 s – 0,08 s) w funkcji temperatury początkowej ogranicznika przed zwarcie

### 2.3. Zmiana czasu działania ogranicznika

Dla temperatur 51 K i wyższych maksymalna temperatura podczas zwarcia nie przekroczyła 290 K. Można więc rozważyć dłuższe działanie ogranicznika. Wydłużenie czasu ograniczania prądu zwiększa maksymalną temperaturę taśmy HTS. Na rysunku 6 przedstawione zostały wyniki badań numerycznych ogranicznika w temperaturze początkowej = 72 K dla dwóch czasów działania ogranicznika. Wydłużenie czasu

ograniczania prądu z 0,08 s do 0,1 s spowodowało wzrost maksymalnej temperatury o 13,9 K. Po schłodzeniu w czasie = 3 s różnica temperatur zmniejszyła się do 1,6 K.



**Rys. 6. Przebiegi zmian temperatury taśmy HTS ogranicznika podczas zwarcia zakończonych po czasie 0,08 s oraz po czasie 0,1 s przy temperaturze początkowej = 72 K**

### 3. PODSUMOWANIE

Można zwiększyć wielokrotnie prąd roboczy poprzez obniżenie temperatury pracy ogranicznika. W przypadku badanego ogranicznika sześciokrotne zwiększenie prądu roboczego (poprzez sześciokrotne zwiększenie prądu krytycznego taśmy SF12100) spowodowało wzrost maksymalnej temperatury taśmy HTS powyżej dopuszczalnej temperatury 450 K. Dotyczyło to temperatury początkowej 38 K. Dla wyższych temperatur początkowych maksymalna temperatura uzwojeń nadprzewodnikowych w chwili wyłączenia prądu zwarciovego przez zewnętrzny wyłącznik ( $t = 0,08$  s) nie przekracza 290 K. Dla temperatur powyżej 51 K w przypadku badanego ogranicznika można rozważać zwiększenie czasu ograniczania prądu.

Wydłużenie czasu pracy ogranicznika zwiększa maksymalną temperaturę taśmy HTS i wydłuża czas schładzania ogranicznika po ograniczeniu zwarcia.

### LITERATURA

1. Majka M., Kozak J., Kozak S., Wojtasiewicz G., Janowski T.: Design and Numerical Analysis of the 15 kV Class Coreless Inductive Type SFCL. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25 , no. 3, pp. 5601005, 2015.

2. Kozak J., Majka M., Kozak S., Janowski T.: Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, pp. 5601804, 2012.
3. Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S.: Design and Development of the First Polish Superconducting Fault Current Limiter for MV Distribution Systems. Physics Procedia vol. 36, pp. 845-848, 2012.
4. Kozak J., Majka M., Kozak S.: Experimental Results of a 15 kV, 140 A Superconducting Fault Current Limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, pp. 5600504, 2017.
5. Majka M., Kozak J., Kozak S.: HTS Tapes Selection for Superconducting Current Limiters. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, pp. 5601405, 2017.
6. Majka M., Kozak S.: Zastosowanie taśm I i II generacji do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu. Przegląd Elektrotechniczny, nr 5, s. 183-185, 2009.
7. Data from Superpower Inc: superpower-inc.com.
8. Shen B., Li J., Geng J., Fu L., Zhang X., Li Ch., Zhang H., Dong Q., Ma J., Coombs T.A.: Investigation and comparison of AC losses on stabilizer-free and cooper stabilizer HTS tapes. Physica C: Superconductivity and its applications, Volume: 541, pp. 40-44, 2017.

Przyjęto do druku dn. 09.03.2020 r.

## INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE OPERATION OF THE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER FOR MEDIUM VOLTAGE NETWORKS

Sławomir KOZAK, Michał MAJKA, Janusz KOZAK

**ABSTRACT** *The superconducting fault current limiter (SFCL) for medium voltage networks cooled using a cryocooler was financed by NFOŚiGW and NCBiR, under the project: GEKON2 / O2 / 267193/13/2015, and was tested in the Electrotechnical Institute. The 2nd generation high temperature superconductor (HTS) tape – SF12100 was used to build this SFCL. In this limiter it is possible to change the operating temperature. The limiter operation was analyzed at three temperatures: 72 K, 80 K and 86 K, in which the experimental short-circuit tests were made and at lower temperatures: 38 K, 51 K, 66 K, and at liquid nitrogen temperature: 77,4 K. The operating current can be increased many times by lowering the limiter's operating temperature. For initial temperatures above 51 K, the maximum temperature of the superconducting tapes when the short-circuit current is switched off by an external switch ( $t = 0,08$  s) does not exceed 290 K. For temperatures above 51 K, the current limitation time can be increased. Extending the limiter's operating time will increase the maximum HTS tape temperature and extend the limiter's cooling time after limiting the short-circuit.*

**Keywords:** *superconducting fault current limiter, SFCL, 2nd generation high temperature superconductor tape, HTS*



**Prof. dr hab. inż. Sławomir KOZAK** ukończył studia w Politechnice Lubelskiej uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera elektryka w 1980 roku. W roku 1980 rozpoczął pracę w Zakładzie Badań Podstawowych Instytutu Elektrotechniki w Warszawie od stanowiska asystenta, kończąc w styczniu 2020 roku na stanowisku profesora. Od 30 grudnia 2019 roku zatrudniony jest na stanowisku profesora w Politechnice Lubelskiej w Wydziale Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Głównym obszarem jego zainteresowań naukowych są elektryczne urządzenia nadprzewodnikowe. Bierze udział w projektowaniu, budowaniu oraz badaniach eksperymentalnych urządzeń takich jak: elektromagnesy nadprzewodnikowe, nadprzewodnikowe separatory magnetyczne, SMES-y, nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciowych oraz transformatory nadprzewodnikowe. Zajmuje się tworzeniem modeli matematycznych i numerycznych opisujących zjawiska magnetoelektryczne, termiczne i hydrodynamiczne występujące w urządzeniach nadprzewodnikowych. Modele numeryczne są wykorzystywane do uzyskiwania informacji o trudnych do zmierzenia parametrach nadprzewodnikowych urządzeń elektrycznych oraz jako komputerowe wspomaganie projektowania, do szukania optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych przy zadanych docelowych parametrach elektrycznych lub innych. Jest autorem ponad 120 publikacji w tym ponad 30 samodzielnych. Uczestniczył w 37 konferencjach i sympozjach zagranicznych i krajowych, gdzie wygłosił 27 referatów (5 w języku angielsku) oraz prezentował 18 posterów. Jego liczba cytowań wg. WoS/Scopus wynosi: 331/400. Jego współczynnik cytowań (h-index) wg WoS/Scopus wynosi: 11/13.



