Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 49

XLVIII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów

MKM 2016

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 5-7 września 2016

SPRZĘTOWA SYMULACJA USZKODZEŃ W DIAGNOSTYCE MAGNESÓW NADPRZEWODZĄCYCH

Stanisław SZCZESNY[1], Marek WOŁOSZYK[2], Michał ZIÓŁKO[3]

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
   tel.: 58-347-29-45 e-mail: stanislaw.szczesny@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
   tel.: 58-347-21-13 e-mail: marek.woloszyk@pg.gda.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
   tel.: 58-347-21-13 e-mail: michal.ziolko@pg.gda.pl

Streszczenie: Utrzymanie magnesów nadprzewodzących w stanie nadprzewodnictwa wymaga precyzyjnej kontroli ich parametrów zarówno przed pierwszym uruchomieniem jak i w trakcie ich użytkowania. Dla zapewnienia tej kontroli opracowywany jest obecnie na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (w ramach międzynarodowego projektu FAIR) specjalistyczny system pomiarowo-diagnostyczny do testowania stanu obwodów elektrycznych magnesów nadprzewodzących. Urządzenie to wymaga kalibracji oraz okresowego testowania. Dla realizacji tego zadania budowany jest również sprzętowy symulator obwodów elektrycznych magnesu nadprzewodzącego, który umożliwi także szkolenie obsługi systemu. W artykule opisano koncepcję sprzętowego symulatora magnesu nadprzewodzącego. Przedstawiono założenia projektowe, wymagania stawiane budowanemu urządzeniu oraz sposób ich realizacji.

Słowa kluczowe: symulator magnesu nadprzewodzącego, rezystancja izolacji, quench.

1. WSTĘP

Urządzenie opisane w niniejszym artykule budowane jest w ramach projektu FAIR będącego przedsięwzięciem związanym z rozbudową obiektu badawczego w Darmstadt, w które zaangażowanych jest 10 krajów, w tym Polska. Kluczowym elementem, który ma powstać w ramach projektu jest dwupierścieniowy, nadprzewodzący akcelerator kołowy o obwodzie 1100 m. Umożliwi on przyspieszanie ciężkich jonów do prędkości większej niż 99 % prędkości światła. Aby nadać poruszającej się cząstce energię o takiej wartości należy wytworzyć silne pole elektryczne i magnetyczne, a więc wymusić odpowiednio duży przepływ prądu przez uzwojenia magnesów, co może się wiązać z wydzielaniem dużych ilości ciepła. W przypadku synchrotronu w Darmstadt, w celu ograniczenia strat energii elektrycznej wykorzystano zjawisko nadprzewodnictwa. Wymaga to schłodzenia uzwojeń magnesów do temperatury ciekłego helu tzn. ok. 4 K. Zapewnienie poprawnej pracy magnesów w takich warunkach wymaga kontroli jego parametrów zarówno przed pierwszym uruchomieniem jak i w trakcie użytkowania.

2. SYSTEM POMIAROWO - DIAGNOSTYCZNY

Magnesy nadprzewodzące pracujące w akceleratorze kołowym w Darmstadt muszą spełniać określone wymagania dotyczące m.in. poprawności oraz rezystancji połączeń elektrycznych, a także minimalnej wartości rezystancji izolacji pomiędzy poszczególnymi obwodami oraz pomiędzy zwojami cewki.

Zespół badawczy pracujący na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej pod kierownictwem prof. Leona Swędrowskiego opracowuje obecnie w ramach projektu FAIR system pomiarowo-diagnostyczny, którego zadaniem będzie weryfikacja parametrów obwodów magnesu nadprzewodzącego. W urządzeniu tym można wyodrębnić trzy podstawowe moduły:

1. Moduł testujący rezystancję izolacji przy napięciu stałym pomiędzy poszczególnymi obwodami magnesu: uzwojeniami cewek, czujnikami temperatury, magistralami zasilającymi, obwodami pomocniczymi oraz obudową będącą na potencjale masy układu. Zakres pomiarowy rezystancji sięga wartości rzędu pojedynczych teraomów, natomiast spodziewany prąd upływu przyjmuje wartości kilku – kilkudziesięciu nanoamperów przy napięciu pomiarowym wynoszącym 3 kV.
2. Moduł testujący ciągłość połączeń - zadaniem tego modułu jest kontrola rezystancji i poprawności połączeń elektrycznych obwodów magnesu. W tym przypadku spodziewany zakres pomiarowy rezystancji jest rzędu kilkudziesięciu mikroomów.
3. Moduł testujący stan uzwojeń - podsystem ten odpowiada za wykrywanie zwarć międzyzwojowych w cewkach magnesu nadprzewodzącego. Dokonuje się tego na podstawie analizy przebiegu napięcia rozładowania kondensatora poprzez uzwojenie badanego magnesu o charakterze *RL*.

Istotnym elementem umożliwiającym kontrolę działania budowanego systemu pomiarowo-diagnostycznego jest sprzętowy symulator obwodów magnesu, który zostanie opisany w kolejnym rozdziale.

3. KONCEPCJA SYMULATORA

3.1. Założenia projektowe

Sprzętowy symulator magnesu nadprzewodzącego powinien spełniać szereg założeń projektowych. Bardzo istotna jest jego mobilność. Przyrząd ten będzie wykorzystywany w różnych lokacjach, więc należy ograniczyć gabaryty oraz masę urządzenia. Ze względu na bezpieczeństwo pracy oraz mobilność symulator powinien być pozbawiony zewnętrznego zasilania.

Symulator powinien także możliwie dokładnie odwzorowywać obwody magnesu szczególnie pod kątem kompatybilności złącz oraz poziomów napięć i prądów. Magnes nadprzewodzący jest skomplikowanym urządzeniem, więc dopuszczalne są pewne uproszczenia w budowie symulatora, szczególnie w odniesieniu do obwodów zwielokrotnionych (np. ograniczenie ilości jednakowych obwodów czujników temperatury).

Sprzętowy symulator powinien odwzorowywać różne stany pracy magnesu nadprzewodzącego tzn. stan normalny, normalny w niekorzystnych warunkach otoczenia oraz awaryjny. Stan normalny oznacza, że parametry obwodów magnesu przyjmują wartości znamionowe z określoną dokładnością. Kolejny stan dotyczy sytuacji, w której zmienia się temperatura oraz wilgotność otoczenia magnesu co może spowodować przekroczenie punktu rosy. W takim przypadku na złączach może pojawić wilgoć zwiększająca w sposób istotny prądy upływu podczas testów.

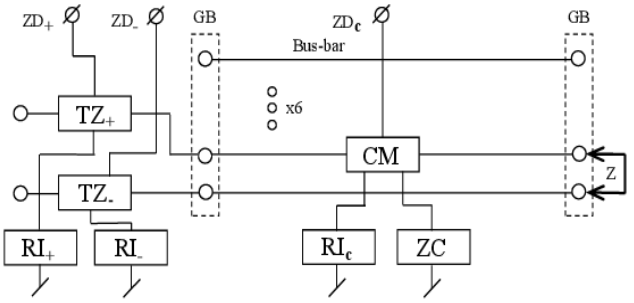
Symulator powinien umożliwić zamodelowanie podstawowych typów czujników temperatury stosowanych w magnesach, pracujących w temperaturach z przedziału od 4 K do temperatury pokojowej. Symulator umożliwiający sprawdzenie modułu testującego stan uzwojenia cewki magnesu nadprzewodzącego powinien uwzględniać jej parametry *RL* w temperaturze pokojowej, a także odpowiednią wytrzymałość na prąd udarowy sięgający wartości kilkuset amperów. Urządzenie powinno cechować się kompatybilnością elektromagnetyczną, ponieważ w otoczeniu symulatora będą znajdowały się urządzenia elektryczne i elektroniczne, których praca nie może zostać zakłócona. Sprzętowy symulator cewki powinien również umożliwić symulację zwarcia międzyzwojowego.

3.2. Realizacja projektu

Głównym celem budowy sprzętowego symulatora obwodów magnesu nadprzewodzącego jest potrzeba kontrolowania poprawności działania systemu pomiarowo-diagnostycznego oraz szkolenie obsługi. Na etapie projektowym należy uwzględnić jego przystosowanie do przeprowadzania konkretnych testów. Z tego względu w symulatorze można wyodrębnić 3 bloki: blok do testowania ciągłości połączeń, do kontroli rezystancji izolacji oraz do badania stanu uzwojenia. Rysunek 1 przedstawia schemat blokowy symulatora.

W schemacie zaprezentowanym na rysunku 1 uwzględniono elementy istotne z punktu widzenia symulatora. Na zamieszczonym obrazie nie uwzględniono części symulatora, która odpowiada za kontrolowanie modułu testującego zwarcia międzyzwojowe, gdyż ze względu na emitowane zakłócenia zostanie ona przygotowana w oddzielnej, ekranowanej obudowie.

Bloki "$RI_{+(-,C)}$" symulujące rezystancję izolacji obwodów magnesu zbudowane są z rezystorów i złącz typu bananowego. Układy są konfigurowane za pomocą zworek umożliwiając wybór odpowiedniej wartości rezystancji symulującej rezystancję izolacji danych obwodów.



Rys. 1. Schemat blokowy części symulatora do testowania ciągłości połączeń oraz rezystancji izolacji, gdzie: GB – gniazda bananowe, $ZD_{+/-/C}$ – złącza diagnostyczne, Z – zwora, a także bloki symulujące: cewkę magnesu (CM), tor zasilania ($TZ_{+/-}$), rezystancję izolacji ($RI_{+/-/C}$) oraz zwarcia (ZC)

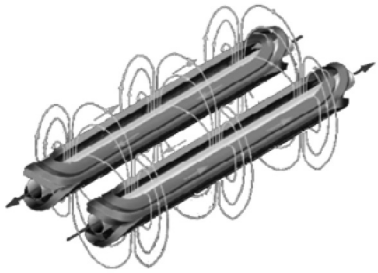
Dla systemu testującego ciągłość i poprawność połączeń jest istotne, aby spadki napięć pomiędzy wyprowadzeniami złącz z odpowiednich punktów obwodów magnesu były mierzalne. Warunek ten nie jest spełniony przy pracy magnesu w stanie nadprzewodnictwa. Większość testów jest wykonywana w temperaturze pokojowej i takie wartości parametrów obwodów magnesów zostały zamodelowane w symulatorze. Do kontroli modułu testującego ciągłość połączeń, elementy obwodów magnesu są w symulatorze reprezentowane przez rezystory, o tak dobranych wartościach, dla których spadki napięć przy prądzie testującym stosowanym w układzie pomiarowym są zbliżone do rzeczywistych. Zgodnie z założeniami symulator powinien w uproszczony sposób odwzorowywać obwody czujników temperatury. Zastosowanie sensorów identycznych jak w obiekcie rzeczywistym jest niewskazane, ponieważ nie umożliwi to kontroli działania systemu przy zmianie temperatury. Bazując na charakterystykach temperaturowych tych czujników w symulatorze zostanie zastosowany zestaw rezystorów. Wybór rezystancji odpowiadającej danej temperaturze będzie dokonywany za pomocą przełącznika wielopozycyjnego.

W sprzętowym symulatorze do sprawdzenia działania modułu testującego rezystancję izolacji uwzględniona zostanie rezystancja izolacji poszczególnych obwodów magnesu: obwodów wysokonapięciowych (bus-bar i cewki), obwodów średnionapięciowych (korektory) oraz obwodów niskonapięciowych (np. czujniki temperatury). Symulator będzie umożliwiał odwzorowanie warunków normalnych, pracy przy niekorzystnych warunkach otoczenia oraz stanu awaryjnego. Wiąże się to z koniecznością zastosowania kilku rezystorów, które będą przełączane w zależności od opcji wybranej przez użytkownika. Ze względu na brak zasilania systemu niemożliwe jest zastosowanie kluczy półprzewodnikowych oraz mechanicznych wymagających zasilania. Dostępność na rynku kluczy mechanicznych ręcznych zdolnych do przełączania napięcia 3 kV jest ograniczona. Z tego względu do wyboru odpowiedniego trybu pracy symulatora zdecydowano się zastosować gniazda typu bananowego, których napięcia znamionowe spełniają wymagania bezpieczeństwa oraz zwór, za pomocą których łączone będą odpowiednie gniazda. Umożliwienie symulacji zwarcia niepełnego przy napięciu 1 kV oraz 2 kV zostanie zapewniona za pomocą warystorów. Należy zwrócić uwagę, iż zmiany położenia zwór można dokonywać tylko przy braku zasilania. Z tego względu

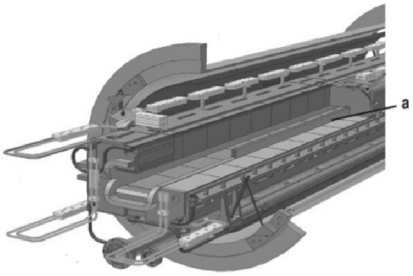
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

dostęp do części urządzenia umożliwiającej jego konfigurację będzie ograniczony. Zrealizowane to zostanie poprzez wybór odpowiedniej konstrukcji obudowy.

Sprzętowy symulator wykorzystywany przez moduł testujący stan uzwojeń powinien umożliwić symulację zwarcia międzyzwojowego. Należało więc oszacować jak zmieni się indukcyjność cewki jeżeli nastąpi zwarcie między sąsiednimi zwojami. Na rysunku 2 przedstawiono sposób ułożenia uzwojenia używany w magnesach generujących duże energie. Natomiast na rysunku 3 pokazano kształt cewki magnesu nadprzewodzącego SIS100 wykorzystanego do budowy synchrotronu w obiekcie badawczym w Darmstadt [1].



Rys. 2. Kształt uzwojenia w magnesach wysokich energii [2]



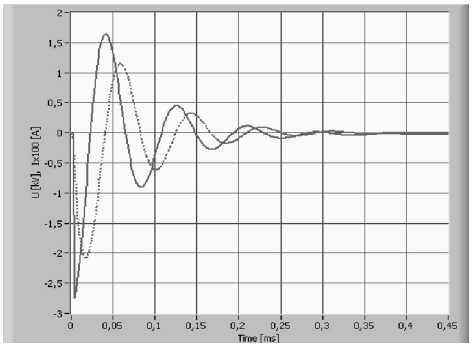
Rys. 3. Sposób ułożenia uzwojenia w magnesie SIS100 [1]

Na podstawie analizy kształtu uzwojenia magnesu SIS100 zaprezentowanego na rysunku 3 stwierdzono, iż w zależności od miejsca wystąpienia zwarcia międzyzwojowego indukcyjność magnesu może zmienić się w zakresie od 15% do 30%.

System pomiarowy zawiera kondensatory pomiarowe które są rozładowywane przez obiekt o charakterze *RL* oraz klucz półprzewodnikowy IGBT. Po załączeniu klucza powstaje obwód drgający *RLC*, w którym częstotliwość oscylacji *f* napięcia i prądu jest opisana zależnością 1 [3].

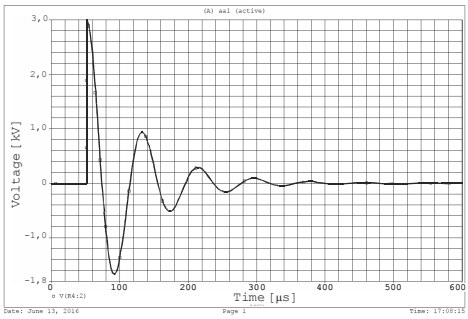
$$f = \frac{\sqrt{-C(CR^2 - 4L)}}{4\pi LC} \tag{1}$$

W obwodzie drgającym pojemność pomiarowa, stanowiąca część systemu pomiarowego, jest znana z tolerancją rzędu 0,5%. W symulatorze magnes jest reprezentowany przez szeregowy model *RL* zawierający cewkę powietrzną oraz rezystor. W rzeczywistym obiekcie uzwojenia magnesu są nawinięte na rdzeniu wykonanym z ferromagnetyka i jego parametry *RL* są zależne od wartości przepływającego prądu oraz częstotliwości sygnału. Należy mieć jednak na uwadze, że podczas diagnostyki magnesu prąd pomiarowy jest niewielki w stosunku do prądu znamionowego i rdzeń pracuje z dala od nasycenia. Stąd dla uproszczenia zależność indukcyjności *L* od prądu można pominąć. Indukcyjność magnesu została zmierzona mostkiem RLC Hameg 8118 i dla częstotliwości pomiarowej 10 kHz wynosi ona 150 μH. Na wartość rezystancji magnesu *R* ma wpływ rezystancja uzwojeń R_{uz} oraz rezystancja R_{fe} reprezentująca straty energii w rdzeniu. Rezystancja uzwojeń została zmierzona i wynosi 115 mΩ. Rezystancję R_{fe} oszacowano na podstawie przebiegów napięcia i prądu uzyskanych na stanowisku badawczym podłączonym do obiektu rzeczywistego [4]. Pomiary wykonano dla magnesu znajdującego się w temperaturze pokojowej. Na rysunkach 5 oraz 6 przedstawiono przebieg napięcia i prądu dla pojemności pomiarowej *C* wynoszącej 1,08 uF.

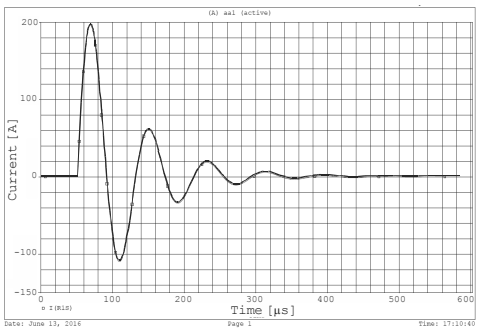


Rys. 4. Przebieg napięcia (linia ciągła) i prądu (linia przerywana) zarejestrowany dla obiektu rzeczywistego przy pojemności pomiarowej *C* wynoszącej 1,08 uF

Na podstawie przebiegów z rysunku 4 oraz symulacji wykonanych w programie PSpice wyznaczono parametry *RL* uzwojenia magnesu. Przebiegi napięcia i prądu przedstawione na rysunkach 5 oraz 6, które nieznacznie odbiegają od rzeczywistych przebiegów zaprezentowanych na rysunku 4, otrzymano dla indukcyjności L = 150 μH oraz rezystancji R_{fe} = 4 Ω.



Rys. 5. Przebieg napięcia dla C = 1,08 uF, L = 150 uF, R_{uz} = 115 mΩ oraz R_{fe} = 4 Ω



Rys. 6. Przebieg prądu dla C = 1,08 uF, L = 150 uF, R_{uz} = 115 mΩ oraz R_{fe} = 4 Ω

Na podstawie przebiegów zamieszczonych na rysunkach 4 - 6 zdecydowano, że w symulatorze magnes będzie reprezentowany przez cewkę powietrzną o indukcyjności L = 150 μH, oraz rezystor R_{uz} o wartości 115 mΩ reprezentujący rezystancję uzwojeń.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

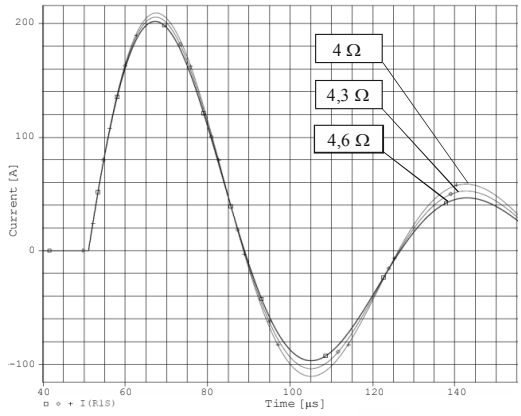
Testowany system ma umożliwić wykrywanie zwarć międzyzwojowych. Pod względem skuteczności najtrudniejsze do zdiagnozowania są zwarcia, które w nieznacznym stopniu wpływają na zmianę indukcyjności. W rzeczywistości badany magnes ma niewielką liczbę uzwojeń, stąd zmiana indukcyjności na skutek zwarcia może mieć wartość rzędu kilkunastu procent. W analizie przyjęto zmniejszenie indukcyjności o 15% do poziomu 127,5 uH i analogiczną zmianę rezystancji uzwojenia.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że na skutek przyjętych zmian parametrów *RL* częstotliwość oscylacji obwodu wzrośnie o około 7,6%. Rezystancja R_{fe}, reprezentująca straty w żelazie rośnie proporcjonalnie do częstotliwości ze względu na straty na histerezę oraz do kwadratu częstotliwości ze względu na straty na prądy wirowe. Dobranie odpowiedniej wartości tej rezystancji może być kluczowe dla jakości działania symulatora, ponieważ głównie ta rezystancja wpływa na współczynnik tłumienia amplitudy ζ opisany wzorem 2 [3].

$$\zeta = \frac{tR}{2L} \tag{2}$$

Zastosowanie w symulatorze rezystora reprezentującego R_{fe} o wartości 4 Ω spowoduje poprawne odwzorowanie zachowania badanego obiektu w przypadku braku uszkodzenia. Jednak gdy wystąpi zwarcie rezystancja 4 Ω może być zbyt mała. Zakładając najbardziej niekorzystny przypadek, w którym rezystancja R_{fe} zmienia się z kwadratem częstotliwości, należałoby zastosować w symulatorze rezystor o 16% większy, czyli o wartości 4,6 Ω.

Różnicę w przebiegu prądu rozładowania kondensatora dla podanej zmiany rezystancji przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Przebieg prądu rozładowania kondensatora dla R_{fe} = 4,6 Ω (grubsza linia), a także 4,3 Ω i 4 Ω

Można zaobserwować, iż różnica pomiędzy przebiegiem uzyskanym dla R_{fe} wynoszącej 4 Ω (reprezentującej nieuszkodzone uzwojenie) i 4,6 Ω (właściwej dla uzwojenia uszkodzonego) jest już stosunkowo duża. Z tego względu w symulatorze można zastosować rezystor o wartości 4,3 Ω znajdujący się w środku przedziału zmian rezystancji R_{fe}. Godzimy się wówczas na stosunkowo niewielki dodatni błąd współczynnika tłumienia amplitudy przy założeniu braku występowania uszkodzenia oraz niewielki ujemny błąd przy założeniu występowania uszkodzenia

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Opisane urządzenie konstruowane jest w ramach projektu FAIR. Budowa sprzętowego symulatora magnesu nadprzewodzącego jest bardzo istotna, gdyż pozwoli on na kalibrację oraz weryfikację poprawności działania systemu pomiarowo-diagnostycznego kontrolującego parametry obiektu rzeczywistego. Zastosowanie magnesu o nieodpowiednich parametrach mogłoby z kolei doprowadzić do groźnej w skutkach awarii akceleratora. Drugim istotnym zastosowaniem symulatora ma być trening obsługi systemu zapewniający bezpieczną pracę z urządzeniem, na wyjściu którego pojawiają się przebiegi o napięciu 3 kV i prądzie ponad 100 A. Wersje prototypowe systemu pomiarowo-kontrolnego oraz symulatora sprzętowego zostaną w najbliższych miesiącach przetestowane na obiekcie rzeczywistym w Darmstadt.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Fischer E., Schnizer P., Akishin P., Kurnyshov R., Mierau A., Schnizer B., Shim S. Y., Sherbakov P.: Superconducting SIS100 Prototype Magnets Test Results and Final Design Issues, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, t. 20, Nr 3 (2010), s. 218-221.
2. Rossi L.: The role of SC Magnets for High Energy Physics, Materiały do wykładu, Council Chamber, CERN, Grudzień 2012.
3. Sobieraj G., J.: The capacitor discharge setup for testing the turn-to-turn insulation of a superconducting magnet coil, GSI International Summer Student Program 2012, 2012, s. 25-30.
4. Ziółko M., Wołoszyk M., Świsulski D.: Błędy wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych impedancji uzwojeń magnesów nadprzewodzących, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 58, Nr 11 (2012), s. 1006-1008.

HARDWARE SIMULATION OF FAILURES IN THE DIAGNOSIS OF SUPERCONDUCTING MAGNETS

The article describes the concept of a hardware simulator of a superconducting magnet. The design assumptions and requirements of the device are presented. Maintaining superconducting magnets capable of superconductivity requires precise control of the parameters before the first run and during their work. To this end, the research team at the Faculty of Electrical and Control Engineering of Gdansk University of Technology conducted research on specialized measuring diagnostic - system testing state circuits for superconducting magnets in the project FAIR.

This device requires periodic calibration and testing. For the realization of this task a hardware simulator of a superconducting magnet is being built, which will also allow user training.

Keywords: simulator superconducting magnet, insulation resistance, quench.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl