

STANOWISKO BADAWCZE DO TESTOWANIA ŁĄCZNIKÓW WYSOKONAPIĘCIOWYCH

Michał ZIÓŁKO

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 21 13 e-mail: michal.ziolko@pg.edu.pl

Streszczenie: Akcelerator ciężkich jonów SIS100 jest budowany na terenie ośrodka badań jądrowych GSI w Darmstadt (Niemcy) w ramach międzynarodowego projektu FAIR. Cząstki elementarne będą w nim rozpędzane do prędkości przekraczających 99% prędkości światła przy pomocy elektromagnesów nadprzewodnikowych, z których będzie zbudowany akcelerator. Przed umieszczeniem magnesów w akceleratorze są one poddawane szczegółowej kontroli w celu oceny ich przydatności do pracy w warunkach nadprzewodnictwa. W Politechnice Gdańskiej jest opracowywany system umożliwiający zautomatyzowaną kontrolę kluczowych parametrów elektrycznych elektromagnesów na etapie ich budowy a także eksploatacji. W celu spełnienia wysokich wymagań dotyczących parametrów oraz trwałości działania, system pomiarowy musi być zbudowany z restrykcyjnie dobranych elementów. W referacie przedstawiono opis stanowiska testującego najważniejsze elementy systemu wraz z przykładowymi wynikami badań.

Słowa kluczowe: akcelerator, łączniki wysokonapięciowe, magnes nadprzewodnikowy, system pomiarowy.

1. WSTĘP

W ramach projektu FAIR realizowanego przez 10 krajów budowany jest w Darmstadt (Niemcy) akcelerator ciężkich jonów SIS100. Zadaniem tego obiektu będą badania nad fizyką cząsteczek elementarnych. Może on także znaleźć zastosowanie w medycynie [1, 2]. Ciężkie jony będą w nim przyspieszane do prędkości przekraczających 99% prędkości światła, co wiąże się ze znacznym zużyciem energii. Z tego względu do budowy akceleratora wykorzystano elektromagnesy z uzwojeniami nadprzewodnikowymi, minimalizując w ten sposób masę obiektu oraz straty energii elektrycznej.

Praca w warunkach nadprzewodnictwa wymaga schłodzenia obwodów prądowych magnesu do temperatury ciekłego helu czyli około 4 K [3]. Właściwa praca elektromagnesu w takich nietypowych warunkach wymaga kontroli jego parametrów w trakcie uruchamiania urządzenia oraz monitorowania ich zmian w trakcie eksploatacji. Do kontrolowanych parametrów zalicza się rezystancja izolacji między obwodami elektromagnesu, rezystancja izolacji międzyzwojowej w jego uzwojeniach, a także jakość i poprawność połączeń elektrycznych. Przykładowo zwarcie międzyzwojowe w magnesie ma wpływ na geometrię pola w akceleratorze i prowadzenie wiązki rozpędzonych cząstek elementarnych. Zbyt mała wartość rezystancji izolacji magnesu lub zwarcie pomiędzy jego obwodami, podobnie

jak wcześniej opisana usterka może doprowadzić do uszkodzenia akceleratora.

Magnesy poddawane są również innym testom, polegającym m.in. na sprawdzeniu jakości parametrów pola wewnątrz jarzma oraz strat energii w rdzeniu. Pracę elektromagnesu w sposób ciągły monitoruje system detekcji zjawiska „quench” [4 - 6]. Również pomiar parametrów RLC uzwojeń może stanowić przesłankę diagnostyczną świadczącą o degradacji obwodów magnesu w trakcie użytkowania akceleratora [7].

Budowany na Politechnice Gdańskiej system pomiarowy ma umożliwić kontrolę parametrów elektrycznych magnesu na etapie uruchamiania i budowy oraz monitorowanie zmian tych parametrów w trakcie eksploatacji. Bardzo istotnymi elementami tego systemu są łączniki wysokonapięciowe. Dobór właściwych łączników stanowił istotny problem ze względu na stawiane im wymagania odnośnie parametrów i trwałości. Poniżej opisano zbudowane stanowisko testujące wybrane parametry elektryczne łączników.

2. WYBÓR ŁĄCZNIKÓW

Łączniki wysokonapięciowe stanowią istotny element dwóch podsystemów pomiarowych budowanych w Politechnice Gdańskiej [8]:

- podsystemu „**HV-DC**” do testowania przy napięciu stałym rezystancji izolacji między poszczególnymi obwodami magnesu. Testowanymi obwodami są m.in.: uzwojenia główne magnesu, czujniki temperatury, magistrale zasilające, obwody korektorów pola oraz obudowa magnesu („cryostat”) połączona z masą układu,

- podsystemu „**HV-Discharge**” do wykrywania zwarć międzyzwojowych w uzwojeniach głównych oraz w uzwojeniach korektorów magnesu nadprzewodzącego. Dokonuje się tego na podstawie analizy przebiegu napięcia i prądu rozładowania kondensatora poprzez uzwojenie badanego magnesu.

W magnesie nadprzewodnikowym znajdują się obwody o różnych napięciach znamionowych. Obwody wysokonapięciowe, takie jak np. uzwojenie główne magnesu pracuje przy napięciu 1,5 kV. Z kolei obwody korektorów pracują przy napięciu 550 V. Natomiast izolacja własna obwodów czujników temperatury może pracować przy napięciu rzędu kilkudziesięciu woltów. W zależności od wartości tych napięć, do wyznaczenia rezystancji izolacji w systemie „HV-DC” należy zastosować odpowiednie napięcie

pomiarowe, które może przyjmować następujące wartości [8]: 50 V, 100 V, 1,1 kV lub 3 kV.

Zgodnie z koncepcją systemu „HV-DC” opisaną w [8] źródłem napięcia pomiarowego o ustawianej wartości jest miernik rezystancji izolacji Megger S1-568. Miernik posiada trzy zaciski: „+”, „-” oraz „GUARD”. Sygnały z zacisków miernika są dystrybuowane do mierzonych obwodów magnesu za pośrednictwem matryc: „matrycy HV”, „matrycy MV” oraz „matrycy LV”. Wszystkie matryce pracują w układzie 3x8, z tym że w systemie występują dwie „matryce LV”. Koncepcja ta uległa modyfikacji względem opisanej w [8] ze względu na nowe ustalenia ze zleceniodawcą. Trzy wiersze matryc są podłączone do trzech zacisków miernika rezystancji izolacji, natomiast kolumny są podłączone do obwodów magnesu. Matryce zawierają znaczną liczbę elementów (łączniki, przewody), co wpływa na zmniejszenie rezystancji izolacji kanałów pomiarowych systemu poprzez bocznikowanie. Wymagania odnośnie tej rezystancji są stosunkowo restrykcyjne. FAIR w założeniach określił dopuszczalną rezystancję kanałów pomiarowych na poziomie nie mniejszym niż 10 GΩ, a w wyjątkowych przypadkach nie mniejszym niż 1 GΩ. Wartości te są związane z dopuszczalną rezystancją izolacji magnesu, która nie powinna być mniejsza niż 20 GΩ, w związku z tym własne prądy upływu kanałów pomiarowych nie mogą być zbyt duże w stosunku do prądu pomiarowego.

Z tego względu bardzo istotna przy wyborze łączników dla systemu „HV-DC” była ich odpowiednio duża rezystancja izolacji mierzona pomiędzy otwartymi stykami oraz stykiem a obwodem cewki. Bardzo istotna jest również stabilność tego parametru w czasie. System pomiarowy ma pracować sprawnie w trybie 24/7 przez kilka lat co implikuje dużą liczbę zadziałań łączników. Mają one pracować przy napięciu do 3 kV przy prądach, w zależności od pełnionej funkcji, od ułamków ampera do kilkudziesięciu amperów. Nie są to zatem urządzenia dużych mocy, o których ofertę łatwiej na rynku. Dla prawidłowego działania systemu „HV-DC” rezystancja izolacji pomiędzy otwartymi stykami łączników powinna mieć wartość rzędu setek GΩ lub TΩ co sugeruje stosowanie łączników mechanicznych. Po wnikliwym przeglądzie urządzeń dostępnych na rynku, zostało wybranych tylko kilka nielicznych ofert.

Wybrane w badaniach łączniki zostaną także zastosowane w systemie „HV-Discharge” [8]. Choć w tym wypadku duża rezystancja izolacji jest mniej istotna, inne wymagania pozostają aktualne. Łączniki małej mocy znajdują tu zastosowanie do rozładowania banku kondensatorów lub podłączenia wyjścia przetwornicy wysokonapięciowej do skonfigurowanego banku kondensatorów. W obu przypadkach (ze względu na ograniczenie prądowe wyjścia przetwornicy oraz rozładowanie banków przez rezystory o odpowiednio dużej rezystancji) wymagania odnośnie prądu znamionowego łączników nie są wygórowane i prąd ten jest na poziomie pojedynczych amperów. Inaczej jest w przypadku łączników konfigurujących banki kondensatorów. W przypadku testu i udarowego rozładowania banku kondensatorów przez badane uzwojenie, mogą przez nie przepływać prądy rzędu kilkudziesięciu amperów.

3. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Wybrane łączniki zostały umieszczone na zbudowanym stanowisku badawczym, którego zdjęcie przedstawiono na rysunku 1.



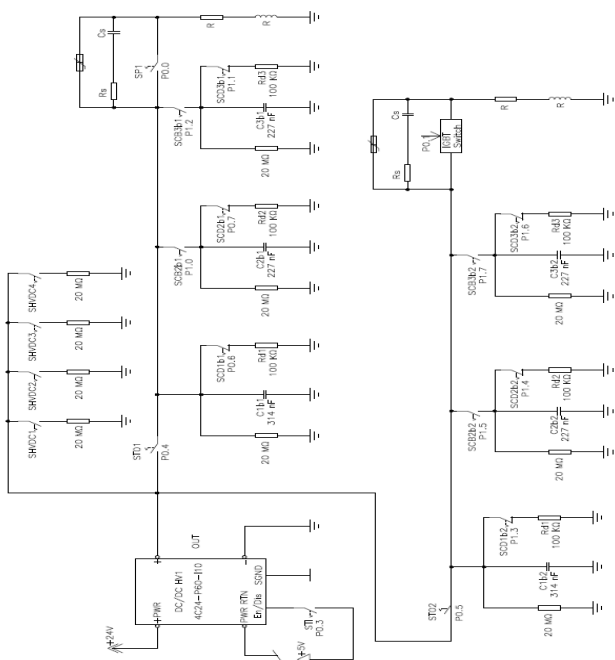
Rys. 1. Wygląd stanowiska badawczego do testowania łączników wysokonapięciowych

Zbudowane stanowisko badawcze działa analogicznie do systemu „HV-Discharge” opisanego w [8]. Badane łączniki są elementami obwodu, który umożliwia udarowe rozładowanie wysokonapięciowych kondensatorów przez model szeregowy RL uzwojenia magnesu. Wyjątkiem są cztery łączniki SHVDC1 – SHVDC4 widoczne na schemacie obwodu elektrycznego stanowiska przedstawionym na rysunku 2, które są obciążone w momencie włączenia rezystancją 20 MΩ. Rezystancja ta symuluje słabą rezystancję izolacji obwodów magnesu testowaną systemem „HV-DC”.

Na schemacie przedstawionym na rysunku 2 można wyróżnić przetwornicę wysokonapięciową firmy Ultravolt, o ustawianym napięciu wyjściowym do 4 kV i mocy 60 W. Na schemacie widoczne są dwa banki kondensatorów oraz dwa szeregowo modele RL uzwojenia magnesu. Zostały one zdwojone aby przetestować różne warianty łączników SPn o dużej mocy. W czasie próby rozładowania banku kondensatorów przez model uzwojenia prąd płynący przez te łączniki może osiągać wartość rzędu 200 A. Pod uwagę brano łącznik stykowy RJ6B-26S firmy Jennings oraz tranzystor IGBT. Muszą się one charakteryzować dużą zdolnością łączeniową, ponieważ w wybranym momencie odpowiadają za podłączenie i udarowe rozładowanie banku kondensatorów przez model uzwojenia RL .

Każdy z obydwu banków składa się z trzech równolegle podłączonych kondensatorów: jednego o pojemności 314 nF i dwóch 227 nF. Kondensator 314 nF jest podłączony na stałe do szyny napięciowej natomiast pozostałe są włączane przez łączniki SCBnbn widoczne na schemacie. W tym zastosowaniu testowano łączniki FRD32062 firmy Cynergy3, GH3 firmy Gigavac oraz RJ1A-26S firmy Jennings o stosunkowo dużych prądach znamionowych. W ich przypadku nie ma dużych wymagań dotyczących zdolności łączeniowych, ponieważ w momencie rozładowywania banku kondensatorów są one zamknięte. Każdy z kondensatorów posiada rezystor rozładowujący 100 kΩ podłączony przez łącznik SCDnbn ze stykami normalnie zwartymi NC. Zbadano tutaj dwa rodzaje

łączników HM24-1B83 oraz H24-1B83 firmy Meder. Ze względów bezpieczeństwa kondensatory są zbrocznikowane dodatkowo rezystorami o dużej rezystancji 20 MΩ.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego do testowania łączników wysokonapięciowych

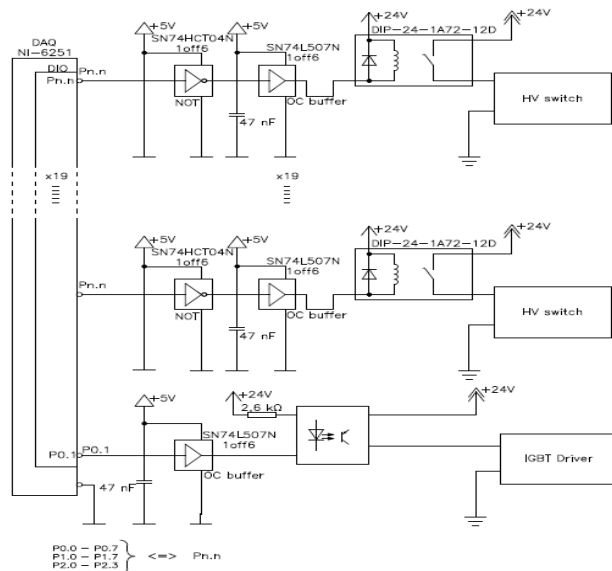
Szyny napięciowe są podłączane do wyjścia przetwornicy wysokonapięciowej przez łączniki STOn. Wykorzystano do tego celu łączniki HE24-1A83 firmy Meder.

Łączniki rozładowujące SCDNbn jak również STOn przewodzą w czasie testów prądy rzędu kilkudziesięciu miliamperów czyli znacznie poniżej ich i tak niewielkiego prądu znamionowego. Prądy te odpowiadają spodziewanym wartościom w czasie ich użytkowania w systemie. Podobna sytuacja dotyczy łączników SHVDCn. Testowano tutaj cztery rozwiązania: H24-1A83, HM24-1A83, HM24-1B83 firmy Meder oraz DAT72410F firmy Cynergy3.

Wszystkie łączniki na stanowisku są sterowane przy pomocy wyjść cyfrowych karty NI-6251 firmy National Instruments zainstalowanej w komputerze PC. Ze względu na niewielki prąd wyjściowy karty, sterowanie nie jest bezpośrednie lecz z wykorzystaniem układu pośredniczącego (UP), który zapewnia dodatkowo separację galwaniczną. Schemat UP przedstawiono na rysunku 3.

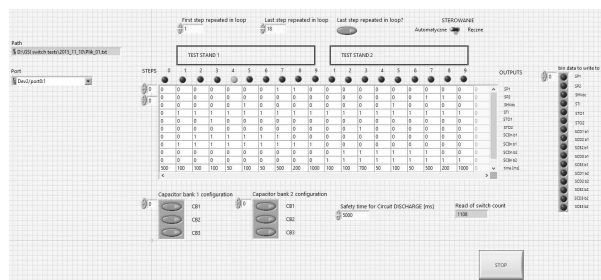
Jak widać na schemacie przedstawionym na rysunku 3 karta UP zawiera 19 kanałów, które są podłączone do wyjść cyfrowych karty. Każdy kanał zawiera negator logiczny oraz bufor wzmacniający sygnał cyfrowy. Wzmocniony sygnał zasila cewki przekaźników kontaktronowych, które zapewniają separację galwaniczną i są podłączone do cewek badanych łączników. Jedno z wyjść cyfrowych karty za pośrednictwem wzmacniacza jest z kolei podłączone do sterownika tranzystora IGBT. Karta NI-6251 jest obsługiwana przy pomocy aplikacji napisanej w środowisku LabVIEW firmy National Instruments. Panel przygotowanej aplikacji przedstawiono na rysunku 4.

Na środku panelu jest widoczna tablica, przy pomocy której ustala się scenariusz załączeń poszczególnych łączników realizowany w kolejnych krokach. W tym miejscu ustala się również czas realizacji kolejnych kroków.



Rys. 3. Schemat układu pośredniczącego UP

Poniżej tablicy znajdują się przyciski konfiguruje ilość podłączonych w bankach kondensatorów do szyny napięciowej. Po prawej stronie przycisków znajduje się kontrolka, w której jest ustawiony czas (podany w milisekundach) do bezpiecznego rozładowania kondensatorów. Po naciśnięciu przycisku STOP widocznego na rysunku 4 w prawym dolnym rogu, w tym czasie łączniki rozładowujące SCDNbn są zamknięte.



Rys. 4. Panel aplikacji stanowiska do badania łączników wysokonapięciowych

Nad przyciskiem STOP znajduje się kontrolka, w której jest wyświetlana liczba iteracji scenariusza działania stanowiska realizowanego w pętli. Liczba ta jest zapisywana w pliku tekstowym, którego lokalizacja na dysku jest określona przy pomocy kontrolki znajdującej się w lewym górnym rogu panelu.

4. PRZYKŁADOWE BADANIA

Jednym z badanych parametrów podczas testów była rezystancja izolacji $R_{iz, styk-styk}$ pomiędzy otwartymi stykami łącznika. Parametr ten, jak pisano wcześniej, jest istotny dla poprawnego działania chociażby systemu „HV-DC”. Pogorszenie się tej izolacji może być zwiastunem degradacji łącznika np. na skutek odparowania drobin metalu ze styków i ich osadzania się wewnątrz jego obudowy. Łączniki w układzie testowym pracują w warunkach napięciowych i obciążeniowych odpowiadających ich docelowemu przeznaczeniu w systemach pomiarowych.

Rezystancja izolacji $R_{iz, styk-styk}$ była mierzona przy pomocy miernika Megger S1-568 przy napięciu próby 3 kV po różnej liczbie N_w zadziałań łączników. Pierwszy pomiar wykonano przy $N_w=0$ dla nowych łączników. Następnie

łączniki umieszczono w obwodzie stanowiska, które realizowało w pętli scenariusz testowy w trybie 24/7. Pomiary porównawcze przeprowadzono po $N_w=315000$ oraz 530000 zadziałań. Można w tym miejscu podkreślić, że osiągnięcie takiej liczby zadziałań zajęło około 2 miesięcy. Podczas każdego pomiaru testowane łączniki były odłączane od obwodu stanowiska, a ich obudowy starannie czyszczone dla osiągnięcia analogicznych warunków pomiaru. Dotyczy to również warunków środowiskowych (temperatura, wilgotność), które były mierzone. Wyniki przykładowych pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Tablica 1. Zmierzona rezystancja izolacji $R_{iz.styk-styk}$ w funkcji liczby zadziałań N_w przykładowych łączników

L.p.	Model	$R_{iz.styk-styk}$ [TΩ]		
		$N_w=0$	$N_w=315000$	$N_w=530000$
1	DAT72410F	>7,5	>7,5	>7,5
2	HM24-1B83-150	1,6	3,3	3,2
3	H24-1B83	>7,5	>7,5	>7,5
4	FRD32062	>7,5	>7,5/uszk.	>7,5/uszk.
5	GH3	>7,5	>7,5	>7,5
6	RJ1A-26S	>7,5	>7,5	>7,5
7	RJ6B-26S	>7,5	uszk.	uszk.

Analizując wyniki zawarte w tabeli 1 widać brak wpływu liczby zadziałań N_w na zmierzoną rezystancję izolacji $R_{iz.styk-styk}$ niektórych łączników. Były one brane pod uwagę przy wyborze do zastosowania w systemie pomiarowym.

Na uwagę zasługuje badanie łącznika HM24-1B83-150 firmy Meder, dla którego zmierzona rezystancja izolacji $R_{iz.styk-styk}$ na początku próby miała wartość 1,6 TΩ. Po $N_w=315000$ zadziałań rezystancja izolacji wzrosła do 3,3 TΩ a po 530000 zadziałań zmalała do 3,2 TΩ. Trudno wytłumaczyć początkowy wzrost rezystancji izolacji natomiast można przypuszczać, że ma związek ze zjawiskami zachodzącymi w materiałach izolacyjnych fabrycznie nowego urządzenia.

Jeden z łączników, służący do konfigurowania banku kondensatorów (FRD32062 firmy Cynergy3) uległ podczas prób uszkodzeniu poprzez sklejenie styków. Drugi taki sam przetrwał próby nie wykazując pogorszenia rezystancji izolacji, jednak ze względu na uszkodzenie ten model nie był brany pod uwagę do wykorzystania w systemie.

Łącznik mocy SP1 (RJ6B-26S firmy Jennings) również uległ uszkodzeniu. Mimo zapewnień producenta o odpowiednich zdolnościach łączeniowych i zastosowaniu układu gaszeniowego jego styki uległy sklejeniu na skutek zjawiska odbić przy załączaniu obciążenia.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone przy pomocy opisanego stanowiska testowego badania łączników pozwoliły wyłonić grupę urządzeń, które będą zastosowane w systemach pomiarowych do testowania magnesów nadprzewodnikowych. Przy wyborze kierowano się także innymi aspektami takimi jak cena, wielkość itp. Według autora wybrane urządzenia spełniają wszelkie wymagania i rokują bezawaryjne działanie przez cały okres eksploatacji systemów.

6. BIBLIOGRAFIA

- Moritz G.: Rapidly-cycling superconducting accelerator magnets for FAIR at GSI, IEEE Particle Accelerator Conference 2007, PAC, pp 3745-3749.
- Spiller P., et al.: Status of the FAIR Heavy Ion synchrotron project SIS100, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA (USA), pp 3717-3717.
- Stafiniak A., Floch E., Schroeder C., Marzouki F., Walter F.: The GSI Cryogenic Prototype Test Facility; First Experience Gained on 2-Phase-Flow Superconducting Prototype Magnets of the FAIR Project, IEEE Trans. Appl. Supercond., v. 19, no. 3, Jun. 2009, pp 1150-1153.
- Fischer E., Schnizer P., Sugita K., Meier J., Mierau A., Bleile A., Szwangruber P., Muller H., Roux C.: FastRamped Superconducting Magnets for FAIR Production Status and First Test Results, IEEE Trans. Appl. Supercond., v. 25, no. 3, June 2015.
- Kaether F., Schnizer P., Mierau A., Fischer E., Roux C., Marusov V., Sugita K., Weiss H.: Magnetic field characterisation of the first series dipole magnet for the SIS100 accelerator of FAIR, Proceedings of IPAC2016, Busan (Korea), pp 1171-1173.
- Stafiniak A. et al.: Commissioning of the Prototype Test Facility for Rapidly-Cycling Superconducting Magnets for FAIR, IEEE Trans. Appl. Supercond., v. 18, no. 2, June 2008, pp. 1625-1628.
- Świsulski D., Wołoszyk M., Stafiniak A., Wołoszyn M., Ziółko M., Rafiński L.: Testing of the Superconducting Magnets Characteristics, Electronics and Electrical Engineering, No 7 (103), Kaunas (Litwa), 2010, pp 39-42.
- Wołoszyk M., Ziółko M., Swędrowski L.: Diagnostyka obwodów elektrycznych magnesów nadprzewodzących. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 50/2016, Gdańsk, s. 103-107.

TEST STAND FOR TESTING HIGH – VOLTAGE SWITCHES

The SIS100 Heavy Ion Accelerator is being built at the GSI nuclear research centre in Darmstadt (Germany) as part of the international FAIR project. The elementary particles will be accelerated to speeds exceeding 99% of the speed of light by means of superconducting electromagnets, from which the accelerator is built. Before magnets are placed in the accelerator, they are subjected to a detailed inspection in order to assess their suitability for operation in superconductivity conditions. At the Gdansk University of Technology, a system is being developed which allows for automated control of key electrical parameters of electromagnets at the stage of their construction and operation. In order to meet the high requirements concerning parameters and durability of operation, the measuring system must be built of carefully selected elements. High voltage switches are very important elements of this system. Selection of the right switches was an important problem due to the requirements concerning parameters and durability. The paper describes the constructed stand testing selected electrical parameters of the switches.

Keywords: accelerator, HV switches, superconducting magnet, measuring system.