

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL** (11) **237644**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **429439**

(51) Int.Cl.
H01H 33/59 (2006.01)
H01H 9/54 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **01.04.2019**

(54) **Ultraszybki łącznik hybrydowy, próżniowo-półprzewodnikowy do ograniczania skutków zjawiska quenchu w zasilanych prądem stałym nadprzewodzących obwodach indukcyjnych o dużych energiach magnetycznych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

05.10.2020 BUP 21/20

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

04.05.2021 WUP 09/21

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, Łódź, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:

MAREK BARTOSIK, Łódź, PL

PIOTR BORKOWSKI, Łódź, PL

FRANCISZEK WÓJCIK, Łódź, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Ewa Kaczur-Kaczyńska

PL 237644 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest ultraszybki łącznik hybrydowy, próżniowo-półprzewodnikowy do ograniczania skutków zjawiska quenchu w zasilanych prądem stałym nadprzewodzących obwodach indukcyjnych o dużych energiach magnetycznych.

Do zasilanych prądem stałym nadprzewodzących obwodów indukcyjnych o dużych energiach magnetycznych zalicza się nadprzewodzące cewki elektromagnesów stosowanych w różnych urządzeniach, między innymi w akceleratorach cząstek elementarnych, w tokamakach lub stellaratorach do kontrolowanej reakcji termojądrowej, w spektroskopii NMR (nuclear magnetic resonance), w przemysłowych generatorach plazmy, w trakcji kolejowej na poduszce magnetycznej, w łożyskach nadprzewodzących, w nadprzewodzących magazynach energii. Nadprzewodzące obwody magnetyczne magazynują podczas pracy duże energie w swym polu magnetycznym. Z różnych przyczyn przy chwilowym, lokalnym uwolnieniu się ciepła wystarczającego do wywołania zaniku nadprzewodnictwa, tworzy się obszar rezystancyjny w nieznanym miejscu cewki (quench) i szybko rozprzestrzenia się wskutek przewodzenia ciepła generowanego przez straty czynne w obszarze rezystancyjnym i rozpraszania w tym obszarze dużej energii magnetycznej. Może to spowodować bardzo duże uszkodzenia całego elektromagnesu nadprzewodzącego.

Sposoby zapobiegania skutkom zjawiska quenchu są przedmiotem wielu publikacji (IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, Issue 1, 1992; LHC Project Report 484, 2001 (PAC 2001); IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 15, Issue: 2, 2005; Vol. 25,

Issue 3, 2015; materiały seminariów: Grupy QPS, CERN, Genewa, 2006 oraz ZEJ WFilS AGH, Kraków, 2007). Spośród nich zasadnicze znaczenie ma sposób polegający na tym, że po wykryciu quenchu bezzwłocznie wyłącza się zasilanie i możliwie szybko, poza cewką nadprzewodzącą, rozprasza się jej energię magnetyczną, korzystnie wskutek jej zamiany na ciepło.

I tak na przykład w dotychczas stosowanych urządzeniach do ekstrakcji energii magnetycznej z elektromagnesów nadprzewodzących, wykorzystywana jest od wielu lat między innymi zasada zasilania cewek nadprzewodzących przez szeregowy opornik R zbocznikowany zespołem kilku magnetowydmuchowych styczników (połączonych szeregowo-równolegle) otwieranych w przypadku pojawienia się quenchu. Wówczas, po bezzwłocznym wyłączeniu i zwarciu źródła zasilania, wzrost napięcia łuku podczas wyłączania prądu cewki przez styczniki powoduje przejście z nich tego prądu przez opornik R i wytracenie w nim energii magnetycznej. Taki układ łączeniowy, w stosunku do typowych przemysłowych układów łączeniowych prądu stałego, pracuje w elektrycznych i środowiskowych warunkach specjalnych (relatywnie niskie napięcie, dowolny kierunek prądu, niewystępowanie przeciążeń i zwarc, typowe wewnętrzne warunki środowiskowe, ale relatywnie wysoki poziom radiacji), przy czym ze względu na wysokie koszty elektromagnesów nadprzewodzących musi być dostatecznie niezawodny i możliwie szybko działający przy wyłączaniu, dla maksymalnego ograniczania skutków quenchu. Podsumowując, łącznik bocznikujący opornik R powinien być niskonapięciowy, niespolaryzowany, sterowalny w sposób zamierzony przy załączaniu lub wyłączaniu (tj. bez samoczynnych wyzwalaczy nadprądowych), wewnętrzny, odporny na promieniowanie, ultraszybki przy wyłączaniu prądu. Dotyczy to zwłaszcza akceleratorów i zastosowań pokrewnych, w pozostałych zastosowaniach część wymagań można wyeliminować według potrzeb. Stosowane dotychczas do ochrony nadprzewodzących cewek elektromagnesów łączniki magnetowydmuchowe, budowane z zasady jako niespolaryzowane, spełniają większość wyżej wspomnianych wymagań, ale nie są zdolne do wyłączania ultraszybkiego, co wynika z zasady ich działania. Minimalny całkowity czas wyłączania łącznika magnetowydmuchowego, będący sumą stałego czasu własnego otwierania oraz czasu łukowego zależnego od parametrów obwodu, jest relatywnie długi i niemożliwy do skrócenia, co uniemożliwia dalszy wzrost efektywności ograniczania skutków quenchu przy wykorzystaniu takich łączników.

Wszystkie wyżej wspomniane wymagania spełniają ultraszybkie, hybrydowe (próżniowo-półprzewodnikowe) łączniki prądu stałego, zwane dalej UHVP, o dwóch możliwych zasadach działania: UHVP ultraszybko wyłączający prąd za pomocą hybrydowego, próżniowo-tyrystorowego układu o komutacji wymuszonej UHVW, albo UHVP ultraszybko wyłączający prąd za pomocą próżniowo-tranzystorowego układu o komutacji naturalnej UHVN.

Ultraszybki łącznik hybrydowy, próżniowo-półprzewodnikowy o komutacji wymuszonej do ograniczania skutków zjawiska quenchu w zasilanych prądem stałym nadprzewodzących obwodach indukcyjnych o dużych energiach magnetycznych, **według wynalazku** jest wyposażony w główny tor prą-

dowy, który zawiera główny wejściowy zacisk przyłączowy dołączony do wejściowego zacisku przyłączowego komory próżniowej zespołu ultraszybkiego łącznika próżniowego, której wyjściowy zacisk przyłączowy jest dołączony do głównego wyjściowego zacisku przyłączowego łącznika. Nadto do komory próżniowej jest równolegle dołączony moduł wyłączający złożony z generatora przeciwprądu oraz zespołu dwóch tyrystorów w układzie przeciwsobnie szeregowym, zbocznikowanych diodami zwrotnymi tak, że do wyjściowego zacisku przyłączowego komory próżniowej jest dołączony wejściowy zacisk przyłączowy zespołu tyrystorów, przy czym do wejściowego zacisku przyłączowego zespołu tyrystorów są dołączone anoda jednego z tyrystorów i katoda jednej diody zwrotnej, zaś katoda tego tyrystora i anoda tej diody są połączone ze sobą i dołączone do połączonych ze sobą katody drugiego tyrystora i anody drugiej diody zwrotnej, natomiast anoda tego drugiego tyrystora i katoda tej drugiej diody są połączone ze sobą i dołączone do wyjściowego zacisku przyłączowego zespołu tyrystorów. Ponadto do wyjściowego zacisku przyłączowego zespołu tyrystorów jest dołączony wejściowy zacisk przyłączowy generatora przeciwprądu złożonego z kondensatora komutacyjnego i dławika komutacyjnego połączonych szeregowo tak, że jedna okładka kondensatora jest dołączona do wejściowego zacisku przyłączowego generatora przeciwprądu, druga okładka kondensatora jest dołączona do jednego zacisku dławika, którego drugi zacisk jest dołączony do wyjściowego zacisku przyłączowego generatora przeciwprądu. Ponadto wyjściowy zacisk przyłączowy generatora przeciwprądu jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączowego komory próżniowej.

Ultraszybki łącznik hybrydowy, próżniowo-półprzewodnikowy o komutacji naturalnej do ograniczenia skutków zjawiska quenchu w zasilanych prądem stałym nadprzewodzących obwodach indukcyjnych o dużych energiach magnetycznych, **według wynalazku**, jest wyposażony w główny tor prądowy, który zawiera główny wejściowy zacisk przyłączowy dołączony do wejściowego zacisku przyłączowego komory próżniowej zespołu ultraszybkiego łącznika próżniowego, której wyjściowy zacisk przyłączowy jest dołączony do głównego wyjściowego zacisku przyłączowego łącznika. Nadto do komory próżniowej jest równolegle dołączony tranzystorowy zespół wyłączający złożony z dwóch tranzystorów w układzie przeciwsobnie szeregowym, zbocznikowanych diodami zwrotnymi tak, że do wyjściowego zacisku przyłączowego komory próżniowej jest dołączony wejściowy zacisk przyłączowy tranzystorowego zespołu wyłączającego, a nadto do wejściowego zacisku przyłączowego tranzystorowego zespołu wyłączającego są dołączone kolektor jednego tranzystora i katoda jednej diody zwrotnej, zaś emiter tego tranzystora i anoda tej diody zwrotnej są połączone ze sobą i dołączone do połączonych ze sobą emitera drugiego tranzystora i anody drugiej diody zwrotnej, a kolektor tego drugiego tranzystora i katoda tej drugiej diody zwrotnej są połączone ze sobą i dołączone do wyjściowego zacisku przyłączowego tranzystorowego zespołu wyłączającego. Ponadto wyjściowy zacisk przyłączowy zespołu tranzystorowego jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączowego komory próżniowej.

Zespół ultraszybkiego łącznika próżniowego jest złożony z wyłącznikowej komory próżniowej, korzystnie z zestykiem generującym osiowe pole magnetyczne, która jest mechanicznie połączona z prostowodowym napędem indukcyjno-dynamicznym otwierającym w znany sposób komorę ultraszybko i zamykającym ją z normalną prędkością, a nadto z zamkiem elektromagnesowym blokującym komorę w stanie otwarcia.

Zespół generatora przeciwprądu, złożony z połączonych szeregowo kondensatora komutacyjnego i dławika komutacyjnego, charakteryzuje się tym, że jego kondensator jest połączony z przetwornicą zasilaną napięciem pomocniczym, przeznaczoną do ładowania kondensatora do napięcia początkowego.

Zespół tyrystorowy, złożony z połączonych przeciwsobnie szeregowo dwóch szybkich tyrystorów, zbocznikowanych diodami zwrotnymi, charakteryzuje się tym, że każdy z tyrystorów jest niezależnie załączany przez zespół sterowania mający odpowiednio separowane wyjścia impulsów bramkowych, według zaprogramowanej sekwencji sygnałów sterujących.

Zespół tranzystorowy jest złożony z połączonych przeciwsobnie szeregowo dwóch tranzystorów IGBT zbocznikowanych diodami zwrotnymi, przy czym każdy z tranzystorów jest niezależnie załączany przez zespół sterowania mający odpowiednio separowane wyjścia impulsów bramkowych, według zaprogramowanej sekwencji sygnałów sterujących.

Komutacja wymuszona polega na sprowadzeniu w komorze próżniowej prądu stałego do zera za pomocą impulsu przeciwprądu z dodatkowego zasobnika energii załączanego krótkotrwanie przez zespół tyrystorowy, a komutacja naturalna jest powodowana różnicą napięcia łuku dyfuzyjnego w komorze próżniowej oraz napięcia przewodzenia bocznikującego ją zespołu tranzystorowego załączanego krótkotrwanie.

kotrwale. Oba zespoły półprzewodnikowe, tyrystorowy i tranzystorowy, są tak zbudowane, że mają zdolność autoadaptacji do kierunku wyłączanego prądu głównego, dzięki czemu każdy UHVP jest niespolaryzowany i zdolny do samodzielnego załączania i wyłączania prądu o dowolnym kierunku. Szybkie załączanie obwodu nie jest potrzebne. Podstawowe znaczenie dla ograniczania skutków quenchu ma możliwie duża szybkość wyłączania prądu, więc zarówno UHVW jak i UHVN wyłączają prąd ultraszybko, mając całkowite czasy wyłączania prądu poniżej 2 ms w każdych warunkach.

W obu przypadkach ultraszybkie otwieranie UHVP uzyskano dzięki opracowaniu specjalnego zespołu ultraszybkiego próżniowego łącznika zamkowego UV o położeniu trwałym w stanie zamknięcia pod działaniem siły sprężyny zwrotnej, a otwieranego w znany sposób przez jednokierunkowy napęd indukcyjno-dynamiczny dużej mocy (dysk pierścieniowy odrzucany elektrodynamicznie od cewki zasilanej impulsem wieloprądowym z zasobnika energii), utrzymywany w stanie otwarcia przez szybki zamek. Impulsy prądowe w cewce napędu mają pierwszą półfalę o amplitudzie ponad 3 kA i czasie do 300 μ s, zmiany pola magnetycznego cewki indukują prąd w dysku, a interakcja obu prądów generuje impuls napędowej siły elektrodynamicznej. Organ ruchomy łącznika UV jest prostowodowym mechanizmem bezpochyłowym z galwaniczną separacją komory próżniowej od pozostałych elementów, sztywno związanym ze stykiem ruchomym i dyskiem napędowym, co umożliwia bezpośrednio przeniesienie ruchu dysku na styk ruchomy komory próżniowej, tj. bezzwłoczne rozpoczęcie otwierania się jej zestyku w chwili zrównania się wzrastającej siły napędowej dysku z siłą zwrotną. W UHVP stosowane są odpowiednie komory próżniowe produkowane dla wyłączników prądu przemiennej SN. UHVW próżniowo-tyrystorowy o komutacji wymuszonej oraz UHVN próżniowo-tranzystorowy o komutacji naturalnej są wyposażone w identyczne zespoły próżniowego łącznika zamkowego UV współpracujące w każdym z przypadków z różnymi zespołami półprzewodnikowymi, tworzącymi główne układy wyłączające o dwóch różnych topologiach.

Nadto każdy UHVP według wynalazku jest wyposażony w identyczny zespół sterowania złożony z zaprogramowanego sterownika mikroprocesorowego, interfejsu wejście/wyjście oraz zasilacza wytwarzającego w znany sposób niezbędne napięcia wewnętrzne. Wszystkie zespoły lub podzespoły UHVP są zasilane z zewnętrznego źródła napięcia pomocniczego. Za pomocą łączy światłowodowych lub elektrycznych zespół sterowania jest w znany sposób połączony z odpowiednimi wejściami lub wyjściami właściwych zespołów lub podzespołów UHVP. Nadto wszystkie napięcia niezbędne do właściwego działania poszczególnych zespołów są monitorowane i regulowane.

Sekwencje działania UHVP o różnych zasadach działania są bardzo podobne. Różnią się tylko sposobem załączania elementów półprzewodnikowych podczas ultraszybkiego wyłączania prądu głównego, które w przypadku UHVN (tranzystory) są załączane jednocześnie i krótkotrwale (tj. na ściśle określony czas), a w przypadku UHVW (tyrystory) kolejno z zadaniem opóźnieniem. Pozostałe elementy sekwencji łączeniowych są takie same w całym zakresie przewidywanych warunków pracy, w tym dla dowolnego kierunku i wartości prądu głównego (autoadaptacja do kierunku prądu głównego albo przebiegu przeciuprądu, albo przejmowania przez zespół tranzystorów prądu z komory próżniowej).

Każdy ultraszybki UHVP przy każdym wyłączeniu prądu znamionowego ma bardzo małą energię łuku, więc erozja łukowa styków komory próżniowej jest też bardzo mała. W efekcie trwałość łączeniowa każdego UHVP jest równa trwałości mechanicznej komory próżniowej (wg danych producenta, zazwyczaj 10000 łączy) i w tym zakresie łącznik powinien działać niezawodnie. Dalszy wzrost niezawodności systemu wyłączania prądu można uzyskać tylko znana w technice metodą łączenia do współpracy szeregowo dwóch lub więcej łączników elektrycznych UHVP (nadmiarowość, podobnie jak w przypadku styczników magnetowydmuchowych). Czas wyłączania prądu za pomocą UHVP jest około 15-20 razy krótszy niż w przypadku ww. łączników magnetowydmuchowych, co znacząco ogranicza skutki i koszty quenchu. UHVP mają budowę modułową oraz gabaryty umożliwiające montaż w standardowych euro-szafach montażowych i spełniają wymagania właściwych norm dotyczących łączników prądu stałego oraz przewidywalne wymagania specjalne wynikające z zakresu stosowalności.

Każdy łącznik UHVP pracuje w układzie zasilania elektromagnesu nadprzewodnikowego. Obwód główny układu zasilania elektromagnesu jest złożony z niskonapięciowego zasilacza prądu stałego, opornika zbocznikowanego przez załączony UHVP oraz nadprzewodzącej cewki elektromagnesu, tworzących zamkniętą pętlę w której płynie prąd główny. W przypadku awarii cewki sygnał z detektora quenchu powoduje bezzwłoczne wyłączenie zasilacza prądu stałego i zwarcie jego wyjścia oraz pobudzenie UHVP do ultraszybkiego wyłączania prądu głównego i jego przejścia przez opornik, a następnie rozproszenie energii magnetycznej cewki wskutek jej zamiany na energię cieplną w tym oporniku, oddawaną do otoczenia wskutek chłodzenia naturalnego.

Przedmiot wynalazku przedstawiono w przykładzie wykonania na rysunkach fig. 1 i fig. 2, które przedstawiają uproszczone ideowo-blokowe schematy elektryczno-kinematyczne obwodów zasilania elektromagnesów nadprzewodnikowych oraz łączników UHVP przystosowanych do przewodzenia i ultraszybkiego wyłączenia prądu głównego o dowolnej polaryzacji, odpowiednio: fig. 1 – łącznika o komutacji wymuszonej UHVW oraz fig. 2 – łącznika o komutacji naturalnej UHVN.

Układ zasilania 1 elektromagnesu nadprzewodnikowego 4 posiada obwód główny złożony z wejściowego zacisku przyłączeniowego 2, do którego jest dołączony dowolny biegun niskonapięciowego zasilacza prądu stałego 3, którego drugi biegun jest dołączony do wyjściowego przyłącza 7 zasilacza, dołączonego do wejściowego przyłącza 8 elektromagnesu nadprzewodnikowego 4, którego wyjściowe przyłącze jest dołączone do wyjściowego zacisku przyłączeniowego 5. Do wejściowego zacisku przyłączeniowego 2 jest dołączone wejściowe przyłącze opornika 6, którego wyjściowe przyłącze jest dołączone do wyjściowego zacisku przyłączeniowego 5. Ponadto do opornika 6 jest równolegle dołączony łącznik 9 (UHVP) w taki sposób, że wejściowy główny zacisk przyłączeniowy 10 łącznika 9 jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączeniowego 2 głównego obwodu układu zasilania 1, a wyjściowy główny zacisk przyłączeniowy 11 łącznika 9 jest dołączony do wyjściowego zacisku przyłączeniowego 5 głównego obwodu układu zasilania 1.

Łącznik 9 (UHVW o komutacji wymuszonej), pokazany na fig. 1, składa się z zespołu ultraszybkiego łącznika próżniowego 12 złożonego z komory próżniowej 13 z zamkiem elektromagnesowym 14, połączonej z prostowodowym napędem indukcyjno-dynamicznym 15 do ultraszybkiego otwierania komory 13, przy czym zamek 14 i napęd 15 są połączone z zespołem sterowania 21. Główny tor prądowy łącznika 9 uwidocznionego na fig. 1 składa się z głównego wejściowego zacisku przyłączeniowego 10, do którego jest dołączony wejściowy zacisk przyłączeniowy 13a komory próżniowej 13, której wyjściowy zacisk przyłączeniowy 13b jest dołączony do głównego wyjściowego zacisku przyłączeniowego 11 oraz do wejściowego zacisku przyłączeniowego 16a zespołu tyrystorów 16. Zespół tyrystorów 16 jest złożony z połączonych przeciwsośnie szeregowo dwóch tyrystorów 17 i 19 zbocznikowanych diodami zwrotnymi 18 i 20 tak, że do wejściowego zacisku przyłączeniowego 16a zespołu 16 są dołączone anoda tyrystora 17 i katoda diody 18, a katoda tyrystora 17 i anoda diody 18 są połączone ze sobą i dołączone do połączonych ze sobą katody tyrystora 19 i anody diody 20, zaś anoda tyrystora 19 i katoda diody 20 są połączone ze sobą i dołączone do wyjściowego zacisku przyłączeniowego 16b zespołu 16. Zacisk 16b zespołu 16 jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączeniowego 23a generatora przeciuprądu 23 złożonego z kondensatora komutacyjnego 24 i dławika komutacyjnego 25, połączonych szeregowo tak, że jedna okładka kondensatora 24 jest dołączona do wejściowego zacisku przyłączeniowego 23a zespołu 23, druga okładka kondensatora 24 jest dołączona do jednego zacisku dławika 25, którego drugi zacisk jest dołączony do wyjściowego zacisku przyłączeniowego 23b zespołu 23. Zacisk 23b zespołu 23 jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączeniowego 13a komory próżniowej 13. Każdy z tyrystorów 17 albo 19 jest niezależnie załączany przez zespół sterowania mający odpowiednio separowane wyjścia impulsów bramkowych, według zaprogramowanej sekwencji sygnałów sterujących.

Łącznik 9 (UHVW o komutacji wymuszonej) przedstawiony na fig. 1, różni się od łącznika 9 (UHVN o komutacji naturalnej) przedstawionego na fig. 2 pod względem zasady działania, narzucającej różną budowę zespołów półprzewodnikowych 16 (UHVW wg fig. 1 ma zespół tyrystorowy z generatorem przeciuprądu 23, natomiast UHVN wg fig. 2 ma zespół tranzystorowy).

Łącznik 9 (UHVN o komutacji naturalnej), pokazany na fig. 2, składa się z elementów i zespołów 1÷15 identycznych oraz połączonych identycznie, jak w UHVW pokazanym na fig. 1. Identycznie są połączone również między sobą elementy 10, 13a, 13b i 11 głównego toru prądowego łącznika 9, z tym że wyjściowy zacisk przyłączeniowy 13b jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączeniowego 16a zespołu tranzystorów 16 bocznikującego komorę 13. Zespół tranzystorów 16 jest złożony z połączonych przeciwsośnie szeregowo dwóch tranzystorów 17 i 19 zbocznikowanych diodami zwrotnymi 18 i 20 tak, że do wejściowego zacisku przyłączeniowego 16a tranzystorowego zespołu wyłączającego 16 są dołączone kolektor tranzystora 17 i katoda diody zwrotnej 18, zaś emiter tranzystora 17 i anoda diody zwrotnej 18 są połączone ze sobą i dołączone do połączonych ze sobą emitera tranzystora 19 i anody diody zwrotnej 20, a kolektor tranzystora 19 i katoda diody zwrotnej 20 są połączone ze sobą i dołączone do wyjściowego zacisku przyłączeniowego 16b tranzystorowego zespołu wyłączającego 16. Nadto wyjściowy zacisk przyłączeniowy 16b tranzystorowego zespołu 16 jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączeniowego 13a komory próżniowej 13.

Każdy z tranzystorów 17 albo 19 jest niezależnie załączany przez zespół sterowania 21 mający odpowiednio separowane wyjścia impulsów bramkowych, według zaprogramowanej sekwencji sygnałów sterujących.

Prąd główny w łączniku 9 przedstawionym na fig. 1 ($I = I_9$) jest wyłączany za pomocą przeciwprądu przez zespół łącznika próżniowego 12. Zespół sterowania 21, za pomocą interfejsu wejście/wyjście 22, wysyła albo odbiera wewnętrzne lub zewnętrzne sygnały informacyjne lub sterujące, w tym: S1 – sygnał zewnętrzny startu procedury uruchamiania (sterujący, tj. załączenie napięcia pomocniczego U_p), S_{sg} – sygnał zewnętrzny stanu gotowości (informacyjny), S2 – sygnał zewnętrzny zamknięcia łącznika 9 (sterujący), s1 – sygnał wewnętrzny otwarcia zamka 14 i zamknięcia ko mory próżniowej 13 (sterujący), S_{sz} – sygnał zewnętrzny stanu zamknięcia łącznika 9 (informacyjny), S3 – sygnał wewnętrzny wyłączenia (sterujący) albo SQ – sygnał wewnętrzny wyłączenia z detektora quenchu (sterujący, awaryjny), s2 – sygnał wewnętrzny uruchomienia napędu 15 i ultraszybkiego otwarcia komory 13 (sterujący), s3 – sygnał wewnętrzny załączenia tyrystora 17 (sterujący), s4 – sygnał wewnętrzny załączenia tyrystora 19 (sterujący), S_{so} – sygnał zewnętrzny stanu otwarcia łącznika 9 (informacyjny), stosownie do zaprogramowanego cyklu łączeniowego. W zależności od potrzeb sygnały są światłowodowe lub elektryczne. Działanie łącznika 9 (UHVW o komutacji wymuszonej) przedstawionego na fig. 1, albo łącznika 9 (UHVN o komutacji naturalnej) przedstawionego na fig. 2 i główne funkcje zespołów są opisane dla przykładowego cyklu łączeniowego odwzorowującego przypadek załączenia obwodu oraz ultraszybkiego wyłączenia wskutek podania jednego z zewnętrznych sygnałów wyłączenia S3 albo SQ. Działanie łącznika 9 jest takie samo obu przypadkach.

W stanie początkowym łącznik 9 nie jest przygotowany do pracy, nie jest znane położenie zespołu 12 który może być w stanie otwarcia albo zamknięcia.

Cykl łączeniowy każdego łącznika 9 składa się z trzech kolejnych części: sekwencji przygotowawczej, sekwencji załączeniowej oraz ultraszybkiej sekwencji wyłączeniowej.

Sekwencję przygotowawczą inicjuje w chwili t_p sterujący sygnał zewnętrzny S1 startu procedury przygotowawczej, którym jest załączenie napięcia pomocniczego U_p , po czym następuje monitorowane przez zespół 21 autouruchomienie i autodiagnostyka wszystkich zespołów łącznika 9, ustawienie łącznika w stanie otwarcia komory próżniowej 13, a nadto osiągnięcie zadanych wartości wszystkich napięć monitorowanych w znany sposób przez zespół 21. Wówczas łącznik 9 wysyła w chwili t_g zewnętrzny sygnał S_{sg} stanu gotowości (informacyjny), co kończy sekwencję przygotowawczą. Łącznik 9 czeka w stanie gotowości do załączenia. Po dowolnym czasie w chwili t_{iz} zewnętrzny sygnał sterujący S2 zamknięcia łącznika 9 uruchamia sekwencję załączeniową, podczas której zespół 21 poprzez interfejs 22 wysyła w chwili t_{2z} wewnętrzny sygnał sterujący s1 powodujący otwarcie zamka 14 i zamknięcie przez siłę zwrotną F_z napędu 15 komory próżniowej 13 oraz bezprądowe załączenie obwodu głównego, a nadto wysłanie w chwili t_z zewnętrznego sygnału informacyjnego S_{sz} stanu zamknięcia łącznika 9, kończące sekwencję załączeniową. Łącznik 9 czeka, w stanie załączenia i gotowości do ultraszybkiego wyłączenia, na załączenie zasilacza 3 i pojawienie się prądu głównego I.

Po dowolnym czasie, w chwili t_w zewnętrzny sygnał sterujący S3 wyłączenia, albo wewnętrzny sygnał sterujący SQ, powoduje wyłączenie zasilacza 3 i zwarcie jego zacisków 2 i 7, a jednocześnie podany do łącznika 9 uruchamia sekwencję wyłączeniową, podczas której zespół 21 poprzez interfejs 22 wysyła w chwili t_{2w} wewnętrzny sygnał sterujący s2 uruchomienia napędu 15 i ultraszybkiego otwarcia komory 13 samoczynnie blokowanej w stanie otwarcia przez zamek 14, a po zapłonieniu łuku i rozejściu się styków komory 13 na wymaganą odległość wysyła z zadaniem opóźnieniem w chwili t_{3w} wewnętrzne sygnały sterujące zespołami półprzewodnikowymi, zróżnicowane w obu przypadkach pokazanych na fig. 1 (UHVW) oraz fig. 2 (UHVN).

W łączniku 9 (UHVW o komutacji wymuszonej) pokazanym na fig. 1, w chwili t_{3w} zostaje wysłany wewnętrzny sygnał sterujący s3 powodujący załączenie tyrystora 17, a następnie z zadaniem opóźnieniem w chwili t_w zostaje wysłany wewnętrzny sygnał sterujący s4 powodujący załączenie tyrystora 19. Opóźnienie jest tak dobrane, że umożliwi oscylacyjne przeładowanie kondensatora 24, uprzednio naładowanego do napięcia U_{co} , prądem i_{24} w pętli oscylacyjnej o bardzo małym tłumieniu, złożonej z elementów 13a, 13, 13b, 16a, 17 albo 18, 19 albo 20, 16b, 23a, 23b. Wskutek superpozycji prądu głównego i_9 z prądem i_{24} w komorze 13 i autoadaptacji układu do kierunku prądu, w zależności od kierunku prądu głównego i_9 , następuje jego sprowadzenie do zera w komorze 13 i zgaszenie łuku podczas 1. lub 2. półfali prądu i_{24} , a następnie w znany sposób samoistne wyłączenie tyrystorów kończące sekwencję wyłączeniową.

Po wyłączeniu prądu i zgaszeniu łuku w komorze 13 jej wytrzymałość powrotna skokowo wzrasta do tak dużej wartości, że nie może wystąpić ponowny przeskok pod wpływem napięcia powrotnego, co zmienia konfigurację obwodu i powoduje po krótkim oraz samoistnie zanikającym stanie przejściowym przejście całego prądu i_9 z łącznika 9 przez opornik 6 i rozładowanie energii magnetycznej elektromagnesu 4. Łącznik 9, pozostając w stanie otwarcia, samoczynnie podejmuje sekwencję przygotowawczą i wysyła w chwili t_0 zewnętrzny sygnały stanu otwarcia S_{so} (informacyjny). Łącznik 9 czeka w stanie gotowości do załączenia.

W łączniku 9 (UHVN o komutacji naturalnej) pokazanym na fig. 2, sekwencje przygotowawcza i załączeniowa mają do chwili t_{3W} taki sam przebieg, jak w łączniku UHVW o komutacji wymuszonej. W chwili t_{3W} określonej jak poprzednio, zostają jednocześnie wysłane wewnętrzne sygnały sterujące s_3 i s_4 powodujące jednoczesne załączenie tranzystorów 17 i 19 na czas potrzebny do przejścia prądu i_{13} z komory próżniowej 13 pod wpływem różnicy napięć łuku dyfuzyjnego w próżni oraz sumy napięć przewodzenia tranzystora i diody, przy czym, wskutek autoadaptacji układu do kierunku prądu głównego, w zależności od kierunku prądu i_{13} zostaje on przejety przez tranzystor 17 i diodę 20 albo przez tranzystor 19 i diodę 18, po czym tranzystory są wyłączane.

Dalsza część sekwencji wyłączeniowej, rozładowanie energii magnetycznej oraz uzyskanie stanu gotowości łącznika 9 (UHVN o komutacji naturalnej) do załączenia ma taki sam przebieg jak w łączniku UHVW o komutacji wymuszonej.

Zastrzeżenia patentowe

1. Ultraszybki łącznik hybrydowy, próżniowo-półprzewodnikowy o komutacji wymuszonej do ograniczania skutków zjawiska quenchu w zasilanych prądem stałym nadprzewodzących obwodach indukcyjnych o dużych energiach magnetycznych, **znamienny tym**, że jest wyposażony w główny tor prądowy, który zawiera główny wejściowy zacisk przyłączowy (10) łącznika (9), dołączony do wejściowego zacisku przyłączowego (13a) komory próżniowej (13), której wyjściowy zacisk przyłączowy (13b) jest dołączony do głównego wyjściowego zacisku przyłączowego (11) łącznika (9), a nadto do komory próżniowej (13) jest równolegle dołączony moduł wyłączający złożony z zespołu (16) dwóch tyrystorów (17, 19) w układzie przeciwobnie szeregowym, zbocznikowanych diodami zwrotnymi (18, 20) tak, że do wyjściowego zacisku przyłączowego (13b) komory próżniowej (13) jest dołączony wejściowy zacisk przyłączowy (16a) zespołu tyrystorów (16), przy czym do wejściowego zacisku przyłączowego (16a) zespołu tyrystorów (16) są dołączone anoda tyrystora (17) i katoda diody zwrotnej (18), zaś katoda tyrystora (17) i anoda diody (18) są połączone ze sobą i dołączone do połączonych ze sobą katody tyrystora (19) i anody diody zwrotnej (20), natomiast anoda tyrystora (19) i katoda diody (20) są połączone ze sobą i dołączone do wyjściowego zacisku przyłączowego (16b) zespołu tyrystorów (16), ponadto do wyjściowego zacisku przyłączowego (16b) zespołu tyrystorów (16) jest dołączony wejściowy zacisk przyłączowy (23a) generatora przeciwprądu (23) złożonego z kondensatora komutacyjnego (24) i dławika komutacyjnego (25) połączonych szeregowo tak, że jedna okładka kondensatora (24) jest dołączona do wejściowego zacisku przyłączowego (23a) generatora przeciwprądu (23), druga okładka kondensatora (24) jest dołączona do jednego zacisku dławika (25), którego drugi zacisk jest dołączony do wyjściowego zacisku przyłączowego (23b) generatora przeciwprądu (23), a nadto wyjściowy zacisk przyłączowy (23b) generatora przeciwprądu (23) jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączowego (13a) komory próżniowej (13).
2. Ultraszybki łącznik hybrydowy, próżniowo-półprzewodnikowy o komutacji naturalnej do ograniczania skutków zjawiska quenchu w zasilanych prądem stałym nadprzewodzących obwodach indukcyjnych o dużych energiach magnetycznych, **znamienny tym**, że jest wyposażony w główny tor prądowy, który zawiera główny wejściowy zacisk przyłączowy (10) łącznika (9), dołączony do wejściowego zacisku przyłączowego (13a) komory próżniowej (13), której wyjściowy zacisk przyłączowy (13b) jest dołączony do głównego wyjściowego zacisku przyłączowego (11) łącznika (9), a nadto do komory próżniowej (13) jest równolegle dołączony tranzystorowy zespół wyłączający (16) złożony z dwóch tranzystorów (17, 19) w układzie przeciwobnie szeregowym, zbocznikowanych diodami zwrotnymi (18, 20) tak, że do wyjściowego

zacisku przyłączeniowego (13b) komory próżniowej (13) jest dołączony wejściowy zacisk przyłączeniowy (16a) tranzystorowego zespołu wyłączającego (16), a nadto do wejściowego zacisku przyłączeniowego (16a) tranzystorowego zespołu wyłączającego (16) są dołączone kolektor tranzystora (17) i katoda diody zwrotnej (18), zaś emiter tranzystora (17) i anoda diody zwrotnej (18) są połączone ze sobą i dołączone do połączonych ze sobą emitera tranzystora (19) i anody diody zwrotnej (20), a kolektor tranzystora (19) i katoda diody zwrotnej (20) są połączone ze sobą i dołączone do wyjściowego zacisku przyłączeniowego (16b) tranzystorowego zespołu wyłączającego (16), a nadto wyjściowy zacisk przyłączeniowy (16b) tranzystorowego zespołu (16) jest dołączony do wejściowego zacisku przyłączeniowego (13a) komory próżniowej (13).

Rysunki

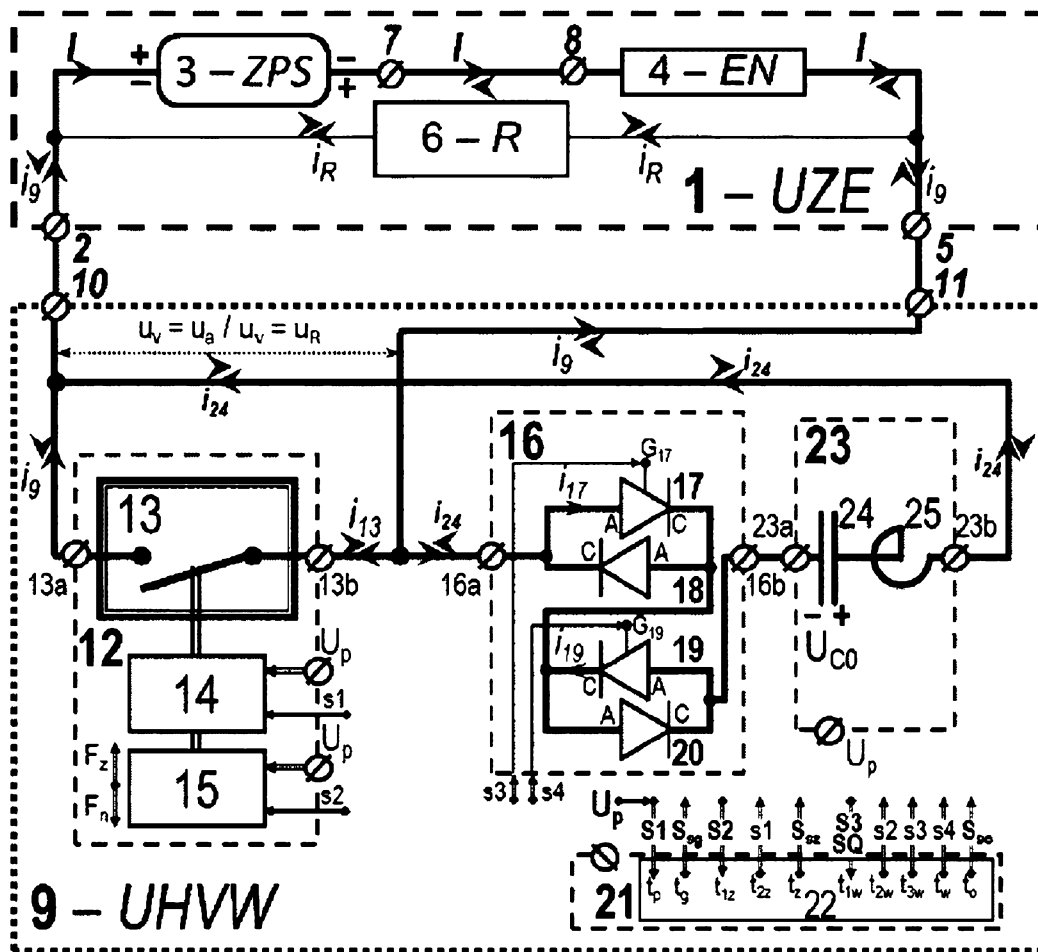


Fig. 1

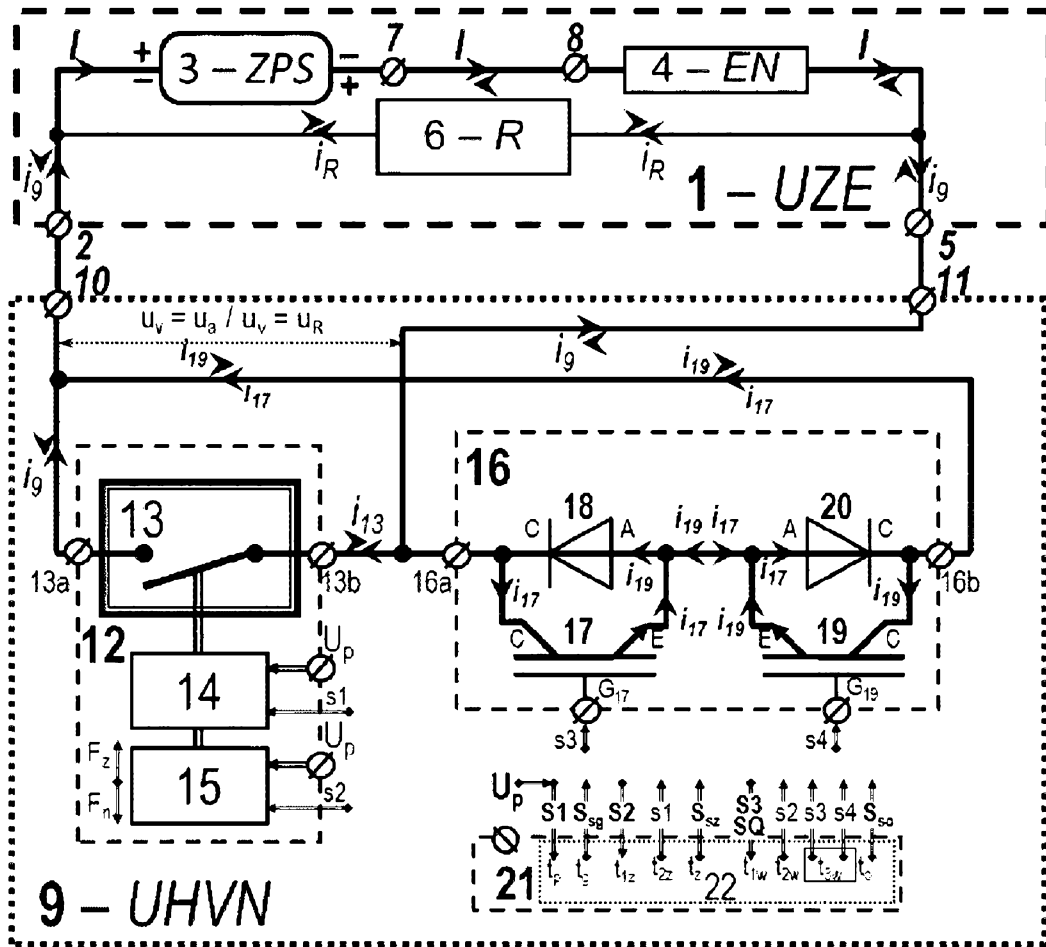


Fig. 2