

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **205678**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **371956**

(51) Int.Cl.  
**H01F 36/00 (2006.01)**

(22) Data zgłoszenia: **28.12.2004**

(54)

**Transformator współosiowy modułarny silnie sprzężony HTS**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

**10.07.2006 BUP 14/06**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

**31.05.2010 WUP 05/10**

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA, GLIWICE, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**BOGUSŁAW GRZESIK, GLIWICE, PL**  
**MARIUSZ STĘPIEŃ, GLIWICE, PL**

(74) Pełnomocnik:

**rzec. pat. Ziółkowska Urszula**  
**Politechnika Śląska**

**PL 205678 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest transformator współosiowy modułarny silnie sprzężony HTS.

Dotychczas znane i stosowane transformatory nadprzewodzące HTS wykonywane są z cewek o kształcie cylindrycznym lub krążkowym. Konstrukcje z takimi cewkami nie gwarantują optymalnego rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej ze względu na nienajlepsze wykorzystanie materiału nadprzewodnika. Optymalny rozkład, to taki, w którym składowa prostopadła indukcji magnetycznej jest bliska zero i ma znacznie niższą wartość w stosunku do wartości składowej równoległej. Optymalny rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej to taki, w którym kierunek indukcji jest równoległy do osi podłużnej przekroju przewodu. W dotychczas znanych rozwiązaniach kierunek indukcji magnetycznej jest równoległy do osi podłużnej przekroju przewodów tylko w części uzwojenia. Często stosowano odkształcanie pola magnetycznego poprzez odpowiednią konstrukcję rdzenia magnetycznego i ukształtowanie uzwojeń w celu zminimalizowania składowej indukcji magnetycznej prostopadłej do osi podłużnej przekroju przewodu. W znanych rozwiązaniach nie wykorzystano tych środków w pełni. Dodatkowo, w większości dotychczas istniejących konstrukcji uzwojeń transformatorów odpowiednie zwoje uzwojenia pierwotnego i wtórnego nie przylegają bezpośrednio do siebie. Rozwiązanie takie cechuje się względnie niskim współczynnikiem sprzężenia uzwojeń, co powoduje wzrost indukcyjności rozproszenia, a tym samym spadek maksymalnej gęstości mocy transformatora.

Z opisu międzynarodowego patentu WO 01/71733 A1 znany jest nadprzewodnikowy transformator osiowy cylindryczny z na przemian ułożonymi cewkami uzwojenia pierwotnego i wtórnego ukształtowanych jako solenoidy cylindryczne. Wadą tego rozwiązania jest rozkład indukcji magnetycznej w uzwojeniach.

Z opisu międzynarodowego patentu WO 97/24736 znany jest także transformator z uzwojeniami z nadprzewodnika, z uzwojeniami współosiowymi ukształtowanymi na swoich końcach tak, aby kierunek indukcji magnetycznej był równoległy do przewodów w tym obszarze. Takie ukształtowanie uzwojeń nie poprawia zasadniczo rozkładu indukcji magnetycznej w uzwojeniach.

Kolejną znaną konstrukcją jest transformator nadprzewodnikowy opisany w patencie europejskim EP 0 273 171 A2, charakteryzujący się współosiowym rozmieszczeniem cylindrycznych uzwojeń w rdzeniu magnetycznym typu kubkowego. Podobnie jak w powyżej omówionych rozwiązaniach i to rozwiązanie nie poprawia zasadniczo rozkładu indukcji magnetycznej w uzwojeniach.

Z opisu amerykańskiego patentu US 5256993A znane jest urządzenie do nadprzewodzącego składowania energii magnetycznej (SMES) zbudowane ze zbiornika wewnętrznego, utrzymującego bardzo niskie kriogeniczne temperatury i zawierającego ciekły hel o temperaturze 1,8°K w którym zanurzone są nadprzewodzące cewki, oraz zbiornika zewnętrznego, w którym panuje próżnia w celu ograniczenia wymiany cieplnej z otoczeniem, wewnątrz którego znajduje się zbiornik wewnętrzny. Urządzenie składa się z jednostek lub modułów.

Z opisu amerykańskiego patentu US 5146383 A znane jest modułowe urządzenie do nadprzewodzącego składowania energii magnetycznej (SMES) składające się w każdym z modułów z kilku szeregowo połączonych koncentrycznych par cewek przy czym moduły zanurzone są bezpośrednio w cieczach gwarantujących temperaturę kriogeniczną.

Transformator według wynalazku charakteryzuje się tym, że stanowi on odpowiednio połączone moduły, z których każdy jest transformatorem o przekładni zwojowej 1:1 składającym się z karkasu, wykonanego z materiału izolacyjnego nieferromagnetycznego, uzwojenia pierwotnego, uzwojenia wtórnego oraz rdzenia magnetycznego, przy czym do karkasu dołączone są dwie rury, zapewniające wymianę czynnika chłodzącego z wnętrzem karkasu, gdzie umieszczony jest system przegród umożliwiający właściwy przepływ czynnika chłodzącego. Warstwy uzwojeń modułu, które mają kształt toroidalny oraz zakończone są końcówkami, ułożone są na przemian z warstwami izolacyjnymi, a ponadto każda warstwa uzwojenia modułu ma taką samą liczbę zwojów, uformowanych w kształcie helisy toroidalnej. Liczba obrotów helisy toroidalnej pojedynczego zwoju uzwojenia modułu jest mniejsza lub równa od ilorazu odległości pomiędzy głównymi osiami przekroju modułu do średnicy danej warstwy uzwojenia. Rdzeń magnetyczny transformatora przylega do najbardziej zewnętrznej warstwy izolacyjnej na uzwojeniu zewnętrznym i ma wykonany otwór, zwany oknem rdzenia, przez który wyprowadzone są rury transportujące czynnik chłodzący oraz końcówki uzwojeń. Całkowita grubość wszystkich warstw uzwojeń w module wraz z warstwami izolacyjnymi nie przekracza 1/5 średniego promienia przekroju wewnętrznej warstwy uzwojenia, przy czym pierwsza wewnętrzna warstwa uzwojenia modułu przylega do karkasu, a następne warstwy uzwojeń rozdzielone warstwami izolacyjnymi przylegają

kolejno do siebie. Uzwojenie pierwotne modułu transformatora jest przyłączone do źródła napięcia przemiennego i ma jedną lub wiele warstw uzwojenia, natomiast uzwojenie wtórne modułu przyłączone jest do odbiornika i ma jedną lub wiele warstw uzwojenia, przy czym liczba warstw uzwojenia pierwotnego modułu jest taka sama jak liczba warstw uzwojenia wtórnego, a uzwojenie pierwotne umieszczone jest w kolejnych warstwach naprzemiennie z warstwami uzwojenia wtórnego. Końcówki uzwojeń modułów połączone są odpowiednio z sobą dając żadaną przekładnię transformatora. Wszystkie moduły transformatora umieszczone są w kriostacie wypełnionym cieczą chłodzącą, który ma na zewnątrz umieszczone wyprowadzenia uzwojeń oraz chłodnicę. Obieg cieczy chłodzącej wewnątrz karkasów wymuszony jest przez pompę wewnętrzną dołączoną do systemu rur transportujących czynnik chłodzący.

W transformatorze współosiowym modularnym według wynalazku każdy moduł jest oddzielnym transformatorem o przekładni 1:1. Dowolną przekładnię transformatora uzyskuje się przez odpowiednie połączenie modułów. Istotną cechą transformatora jest ułożenie uzwojeń gwarantujące ich bardzo wysokie sprzężenie magnetyczne i bardzo dobre wykorzystanie przewodu nadprzewodzącego HTS, z którego są wykonane uzwojenia transformatora.

Transformatory nadprzewodnikowe wysokotemperaturowe HTS wykazują bardzo dobre właściwości energetyczne, w szczególności kilkakrotny wzrost gęstości mocy w porównaniu z transformatorami konwencjonalnymi. Warunkiem do zapewnienia poprawnej pracy transformatora w zakresie nadprzewodnictwa jest utrzymanie prądu, indukcji magnetycznej oraz temperatury w odpowiednich granicach, przy czym istotny jest rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej w obszarze uzwojeń.

Przedmiot wynalazku przedstawiono w przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia pół-przekrój modułu transformatora, fig. 2 - widok modułu transformatora z boku, fig. 3 - przekrój główny modułu transformatora, fig 4 - przekrój częściowy z rurami transportującymi czynnik chłodzący i zaznaczonymi kierunkami przepływu czynnika, fig. 5 - transformator dwumodułowy wraz z systemem chłodzącym, a fig. 6, 7, 8, 9 przedstawiają ułożenie uzwojeń pierwotnych i wtórnych względem siebie.

Pojedynczy moduł transformatora składa się z karkasu izolacyjnego 1, uzwojenia wewnętrznego 2, izolacji międzyuzwojeniowej 3, uzwojenia zewnętrznego 4, izolacji zewnętrznej 5 oraz rdzenia magnetycznego 6. Końcówki 7, 8 uzwojenia wewnętrznego 2 oraz końcówki 9, 10 uzwojenia zewnętrznego 4 znajdują się w oknie rdzenia 11. W oknie rdzenia 11, umieszczona jest rura 12 doprowadzająca czynnik chłodzący do wnętrza karkasu 1 i rura 13 odprowadzająca czynnik chłodzący na zewnątrz karkasu 1. Powierzchnia karkasu 1, uzwojeń 2, 4, izolacji międzyuzwojeniowej 3, izolacji zewnętrznej uzwojeń 5 oraz powierzchnia wewnętrzna rdzenia magnetycznego 6 mają kształt torusa, przy czym punkty krzywej zamkniętej wyznaczającej ten torus są krzywymi o kształcie zbliżonym do okręgu. Torus jest wyznaczony za pomocą osi centralnej 14, płaszczyzny symetrii 15, dwóch osi głównych przekroju 16, 17 oraz osi zakrzywionej 18. Oś zakrzywiona 18 jest krzywą zamkniętą zakreślaną przez środek ciężkości krzywej zamkniętej wyznaczającej powierzchnię torusa. Warstwa uzwojenia wewnętrznego 2 przylega do karkasu izolacyjnego 1, warstwa izolacji międzyuzwojeniowej 3 przylega do uzwojenia wewnętrznego 2, warstwa uzwojenia zewnętrznego 4 przylega do warstwy izolacji międzyuzwojeniowej 3, izolacja zewnętrzna 5 przylega do uzwojenia zewnętrznego 4, natomiast rdzeń magnetyczny 6 przylega swoją powierzchnią wewnętrzną do warstwy zewnętrznej izolacji zewnętrznej 5.

W przykładowym transformatorze uzwojenie wewnętrzne 2 jest ułożone w jednej warstwie i podobnie uzwojenie zewnętrzne 4 także w jednej warstwie. Przewód uzwojenia wewnętrznego 2 transformatora ma kształt helisy rozciągniętej na powierzchni torusa. Kąt pomiędzy styczną do osi przewodu uzwojenia 2 a płaszczyzną główną torusa 15 ma wartość mniejszą od  $\pi/4$ , natomiast kąt obrotu helisy wokół osi zakrzywionej 18 przy jednokrotnym obiegu wzdłuż osi zakrzywionej 18 zależy od liczby obrotów  $k$  i liczby zwojów  $n$  i jest wyznaczony zależnością  $\alpha_n = 2\pi\{k-1/n\}$ . Przewód uzwojenia zewnętrznego 4 jest ułożony równoległe do przewodu uzwojenia wewnętrznego 2, przy tym obydwa przewody mają taki sam kształt. Przewody uzwojeń 2, 4 wykonane są z nadprzewodnika wysokotemperaturowego, HTS. Rdzeń magnetyczny 6 wykonany jest z materiału ferromagnetycznego. Karkas 1 wykonany z materiału izolacyjnego niemagnetycznego w sposób umożliwiający przepływ czynnika chłodzącego od rury doprowadzającej 12 do rury odprowadzającej 13. Właściwy kierunek przepływu czynnika chłodzącego gwarantuje system przegród 21 umieszczony wewnątrz karkasu. Transformator jest umieszczony w kriostacie 22 wypełnionym czynnikiem chłodzącym. Obieg czynnika chłodzącego do i z wnętrza każdego z modułów transformatora zrealizowany jest za pomocą pompy wewnętrznej 23.

Wymagana temperatura czynnika chłodzącego w kriostacie 22 zapewniana jest przez chłodnicę zewnętrzną 24. Uzwojenia modułów połączone odpowiednio systemem szyn 25 dołączone są odpowiednio do zacisków zewnętrznych uzwojenia pierwotnego 26 i uzwojenia wtórnego 27 transformatora.

W innych rozwiązaniach uzwojenia modułu mogą być wykonane w postaci jednej lub wielu warstw. Całkowita liczba warstw jest liczbą parzystą. Liczba warstw przypadająca na uzwojenie pierwotne jest równa liczbie warstw przypadającej na uzwojenie wtórne. Rozwiązanie pokazane na fig. 6 przedstawia dwie warstwy uzwojeń, przy czym warstwa wewnętrzna stanowi uzwojenie pierwotne 28 natomiast warstwa zewnętrzna uzwojenie wtórne 29. Rozwiązanie zobrazowane na fig. 7 zawiera również dwie warstwy uzwojeń, przy czym warstwa wewnętrzna stanowi uzwojenie wtórne 29 a warstwa zewnętrzna uzwojenie pierwotne 28. Natomiast rozwiązanie pokazane na fig. 8 zawiera cztery warstwy uzwojeń, przy czym licząc od warstwy najbardziej wewnętrznej, pierwsza i trzecia warstwa stanowią uzwojenie pierwotne 28 natomiast warstwa druga i czwarta uzwojenie wtórne 29. Rozwiązanie pokazane na fig. 9 zawiera cztery warstwy uzwojeń przy czym licząc od warstwy najbardziej wewnętrznej, pierwsza i trzecia warstwa stanowią uzwojenie wtórne 29 natomiast warstwa druga i czwarta uzwojenie pierwotne 28.

### Zastrzeżenia patentowe

1. Transformator współosiowy modularny silnie sprzężony HTS w którym wszystkie moduły umieszczone są w kriostacie wypełnionym cieczą chłodzącą, **znamienny tym**, że stanowi odpowiednio połączone moduły, a każdy moduł jest transformatorem o przekładni zwojowej 1:1 i składa się z karkasu (1) wykonanego z materiału izolacyjnego nieferromagnetycznego, warstwy lub wielu warstw uzwojenia wewnętrznego (2), warstwy lub wielu warstw uzwojenia zewnętrznego (4) oraz rdzenia magnetycznego (6) przy czym do karkasu (1) dołączone są dwie rury, doprowadzająca (12) i odprowadzająca czynnik chłodzący (13) i wewnątrz karkasu (1) umieszczony jest system przegród (21) umożliwiający właściwy przepływ czynnika chłodzącego a warstwy uzwojeń modułu, które mają kształt toroidalny oraz zakończone są końcówkami (7, 8, 9, 10), ułożone są na przemian z warstwami izolacyjnymi, a ponadto każda warstwa uzwojenia modułu ma taką samą liczbę zwojów, o kształcie helisy, przy czym wszystkie moduły umieszczone są w kriostacie (22) wypełnionym cieczą chłodzącą, który ma na zewnątrz umieszczone wyprowadzenia (26, 27) i chłodnicę (24), a obieg cieczy chłodzącej wewnątrz karkasów wymuszony jest przez pompę wewnętrzną (23) dołączoną do systemu rur transportujących czynnik chłodzący (12, 13).

2. Transformator według zastrz. 1, **znamienny tym**, że rdzeń magnetyczny (6) przylega do najbardziej zewnętrznej warstwy izolacyjnej na uzwojeniu zewnętrznym i ma wykonany otwór (11), przez który wyprowadzone są rury transportujące czynnik chłodzący (12, 13) oraz końcówki uzwojeń (7, 8, 9, 10).

3. Transformator według zastrz. 1, **znamienny tym**, że kąt pomiędzy styczną do osi przewodu uzwojenia (2) a płaszczyzną główną torusa (15) ma wartość mniejszą od  $\pi/4$ , natomiast kąt obrotu helisy wokół osi zakrzywionej (18) przy jednokrotnym obiegu wzdłuż osi zakrzywionej (18) zależy od liczby obrotów  $k$  i liczby zwojów  $n$  i jest wyznaczony zależnością  $\alpha_n = 2\pi(k-1/n)$ .

4. Transformator według zastrz. 1, **znamienny tym**, że całkowita grubość wszystkich warstw uzwojeń w module wraz z warstwami izolacyjnymi nie przekracza  $1/5$  średniego promienia przekroju wewnętrznej warstwy uzwojenia, przy czym pierwsza wewnętrzna warstwa uzwojenia modułu przylega do karkasu, a następne warstwy uzwojeń rozdzielone warstwami izolacyjnymi przylegają kolejno do siebie.

5. Transformator według zastrz. 1, **znamienny tym**, że odpowiednie zwoje uzwojeń modułu są do siebie przyległe w sąsiednich warstwach, przy czym uzwojenie pierwotne modułu jest przyłączone do źródła napięcia przemiennego i ma jedną lub wiele warstw uzwojenia, natomiast uzwojenie wtórne modułu przyłączone jest do odbiornika i ma jedną lub wiele warstw uzwojenia przy czym liczba warstw uzwojenia pierwotnego modułu jest taka sama jak liczba warstw uzwojenia wtórnego, a uzwojenie pierwotne umieszczone jest w kolejnych warstwach naprzemiennie z uzwojeniem wtórnym, i końcówki uzwojeń modułów połączone są odpowiednio z sobą dając żadaną przekładnię transformatora oraz dołączone do wyprowadzeń transformatora.

Rysunki

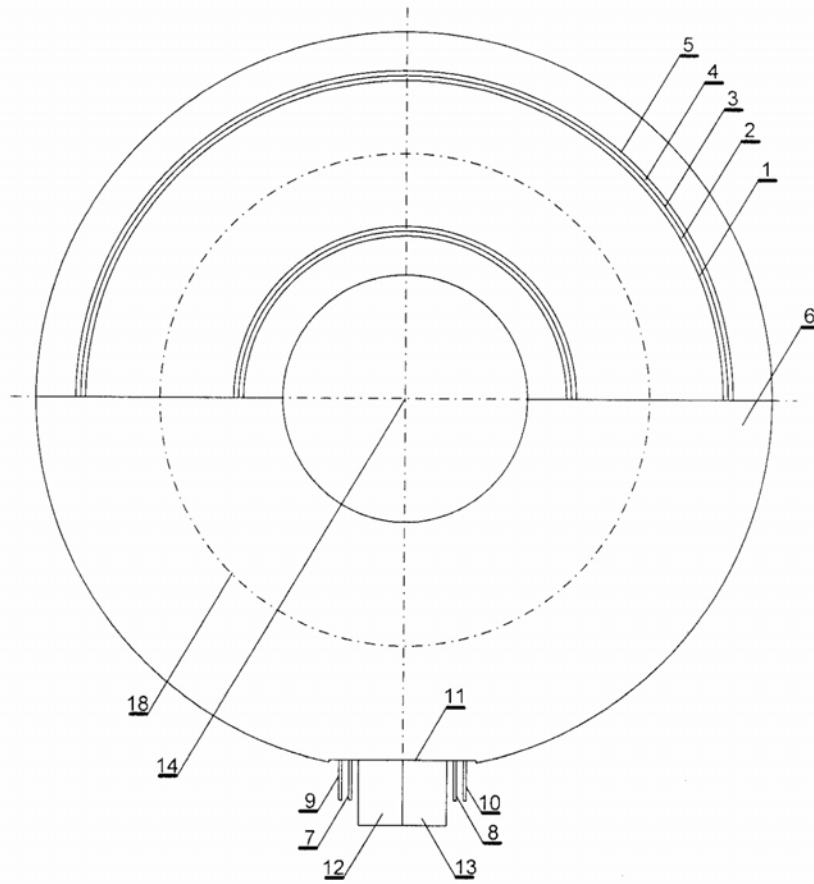


Fig. 1

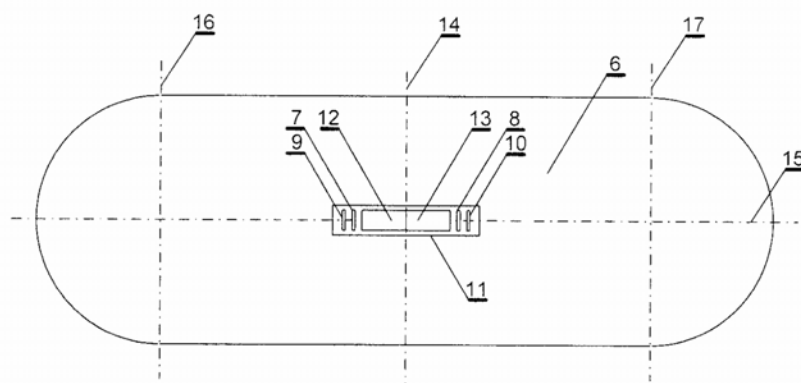


Fig. 2

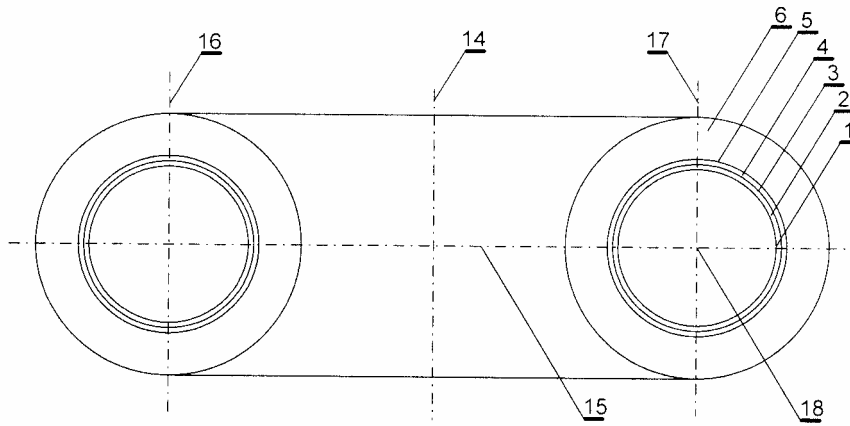


Fig. 3

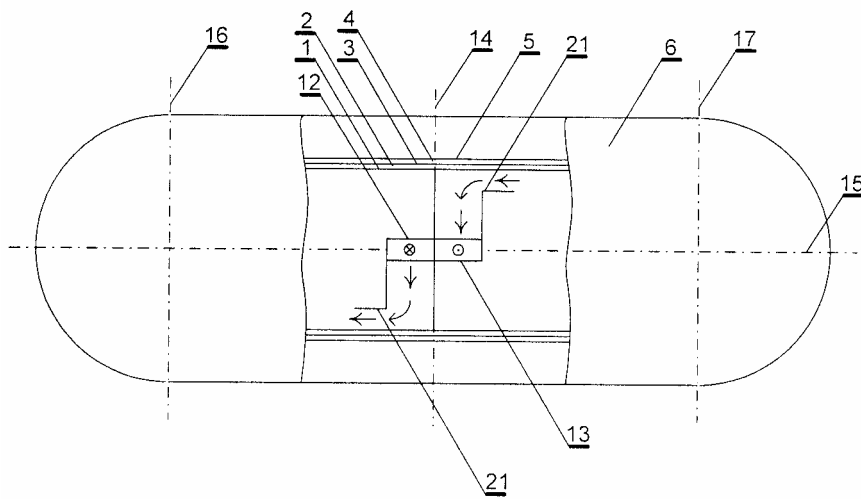


Fig. 4

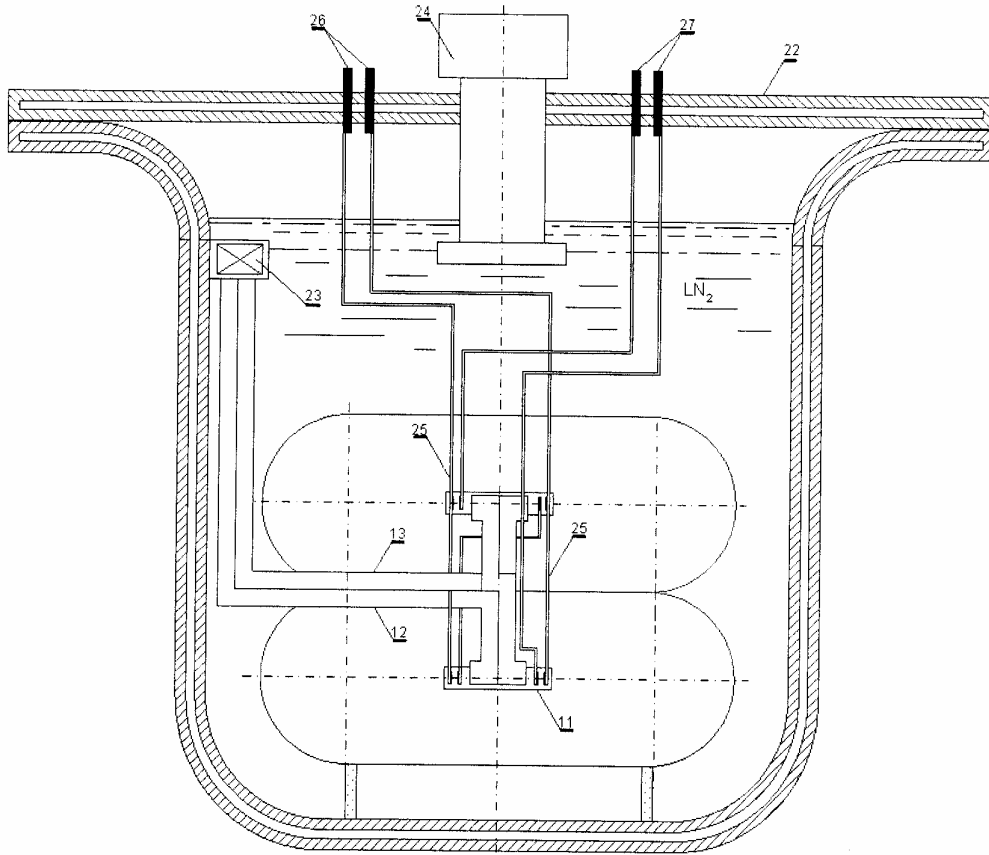


Fig. 5

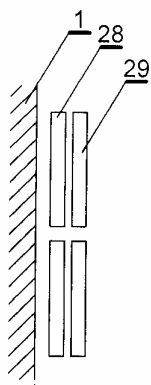


Fig. 6

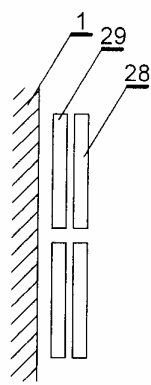


Fig. 7

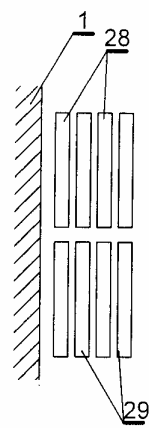


Fig. 8

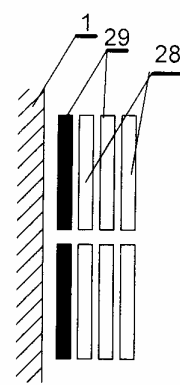


Fig. 9

