RZECZPOSPOLITA POLSKA

Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **224128** (13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **407695**

(22) Data zgłoszenia: **28.03.2014**

(51) Int.Cl.
H02K 3/24 (2006.01)

(54) **Układ chłodzenia wirnika turbogeneratora**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
12.10.2015 BUP 21/15

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
30.11.2016 WUP 11/16

(73) Uprawniony z patentu:
ETHOSENERGY POLAND SPÓŁKA AKCYJNA, Lubliniec, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
JAN ADAMEK, Lubliniec, PL
ROMAN KROK, Tychy, PL
RAFAŁ MANIARA, Tarnowskie Góry, PL
DARIUSZ BARON, Rusinowice, PL

PL 224128 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest układ chłodzenia wirnika turbogeneratora z bezpośrednim systemem chłodzenia uzwojenia wzbudzenia, za pomocą gazowego medium chłodzącego, zwłaszcza wodoru lub powietrza, umożliwiający zwiększenie mocy turbogeneratora.

W przemyśle energetycznym stosuje się różnego typu turbogeneratory o różnej mocy, różnej konstrukcji i różnych systemach chłodzenia. Każdy turbogenerator składa się ze stojana i wirnika. Stojan ma stalowy korpus, a w nim rdzeń wykonany z blach magnetycznych ze żłobkami, w których umieszczone jest uzwojenie stojana. Wirnik stanowi stalowa odkuwka w kształcie walca z wyfrezowanymi promieniowo żłobkami na pewnej długości w środku odkuwki (tzw. beczce), w których umieszczone jest uzwojenie wzbudzenia wytwarzające pole magnetyczne. Uzwojenie wzbudzenia stanowią cewki nawinięte przewodem wykonanym z miedzi. Każda cewka zawiera zwoje połączone szeregowo, przy czym zwój stanowi pojedynczy przewód lub dwa przewody równoległe. Zwoje odizolowane są od siebie za pomocą przekładki izolacyjnej zwanej izolacją międzyzwojową. Każda cewka uzwojenia umieszczona w żłobku wirnika jest od niego odizolowana elektrycznie przy użyciu izolacji głównej żłobkowej. Cewki uzwojenia połączone są szeregowo i są rozmieszczone wokół biegunów wirnika (tzw. duże zęby). W turbogeneratorach najczęściej stosowane są wirniki dwubiegunowe. W uzwojeniu wzbudzenia wyróżnia się część prostą umieszczoną w żłobkach wirnika oraz część ukształtowaną poza żłobkami, stanowiącą połączenia czołowe uzwojenia. Uzwojenie w żłobkach zabezpieczone jest przed skutkami oddziaływania siły odśrodkowej za pomocą klinów żłobkowych wsuwanych między zęby wirnika. Połączenia czołowe uzwojenia wzbudzenia osłonięte są pierścieniami stalowymi zwanymi kołpakami. Wielkość, kształt i wymiary przekroju poprzecznego przewodu uzwojenia wzbudzenia zależą od wartości prądu wzbudzenia i konstrukcji uzwojenia oraz systemu chłodzenia wirnika pośredniego lub bezpośredniego (osiowego lub zabierakowego). Zasilane prądem stałym uzwojenia wirnika maszyn elektrycznych wirujących o dużej mocy (kilkuset MW) i dużej prędkości obrotowej (3000 obr/min), zwłaszcza dwubiegunowych maszyn synchronicznych z wirnikiem cylindrycznym (turbogeneratory) chłodzi się za pomocą chłodziwa gazowego. W maszynach o dużych mocach jako medium chłodzące najczęściej stosuje się wodór, którego zaletami są: duży współczynnik odprowadzania ciepła, mała masa właściwa, mały współczynnik tarcia, stosunkowo duże ciepło właściwe i dobre elektryczne własności izolacyjne.

Z publikacji W. Latek: *TURBOGENERATORY*, WNT Warszawa 1973 r. znane są uzwojenia wzbudzenia wykonane z przewodów o przekroju w kształcie prostokątnym w wirnikach chłodzonych pośrednio oraz z wewnętrznymi kanałami wentylacyjnymi, prostokątnymi bądź zaokrąglonymi w wirnikach chłodzonych bezpośrednio w systemie osiowym. Z tej samej publikacji znane są też uzwojenia wzbudzenia wykonane z przewodów z bocznymi, zewnętrznymi kanałami wentylacyjnymi, prostokątnymi lub zaokrąglonymi w części prostej, żłobkowej uzwojenia, w systemie zabierakowym (szczelinowym).

System osiowy oraz system zabierakowy (szczelinowy) są podstawowymi znanymi dotychczas systemami intensywnego chłodzenia wirników generatorów za pomocą gazowego medium chłodzącego, przeważnie wodoru.

Z polskiego zgłoszenia patentowego nr P. 168834 znany jest układ chłodzenia maszyn elektrycznych z systemem osiowym, w którym wirnik turbogeneratora ma uzwojenie z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi usytuowanymi wzdłuż zwojów.

Przykładowy schemat uzwojenia wzbudzenia generatora z osiowym systemem chłodzenia bez podżłobków przedstawiono na fig. 4 rysunku dotyczącego dotychczasowego stanu techniki. Każda ćwiartka cewki uzwojenia wzbudzenia chłodzona jest strugą medium chłodzącego wpływającą otworami wlotowymi w przewodach w środku czoła cewki i wypływającą otworami wylotowymi w środku beczki wirnika do szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem.

Rozwiązanie z zabierakowym (szczelinowym) systemem chłodzenia opisane zostało między innymi w patentach nr PL174625, DE2704189A1 oraz US4246503A.

Przykładowy schemat uzwojenia wzbudzenia z zabierakowym (szczelinowym) systemem chłodzenia przedstawiono na fig. 5 rysunku dotyczącego dotychczasowego stanu techniki. W przewodach, w czołach cewek uzwojenia wzbudzenia znajdują się kanały osiowe, przez które przepływają dwie strugi gazowego medium chłodzącego. Jedna z nich wpływa do kanałów osiowych w przewodach otworami usytuowanymi na łukach czół cewek, zaś wypływa otworami wylotowymi w środku czół. Druga struga wpływa oddzielnymi otworami znajdującymi się na łukach czół cewek, przepływa kanałami osiowymi w przewodach w kierunku beczki wirnika, a następnie wypływa kanałami promieniowo-

-osiowymi i otworami w klinach żłobkowych z zabierakami w pierwszej strefie wylotowej (STREFIE 1 usytuowanej najbliżej końca beczki). W części żłobkowej uzwojenie wzbudzenia generatora chłodzone jest strugami medium chłodzącego przepływającymi w kanałach promieniowo-osiowych znajdujących się na powierzchni bocznej przewodów uzwojenia wzbudzenia. Medium chłodzące jest pobierane i wyprowadzane do szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem w poszczególnych strefach (STREFY 1-E3) za pomocą otworów w klinach żłobkowych z zabierakami zabudowanych naprzemiennie w kierunku natarcia oraz przeciwnym. Reasumując, w przypadku systemu zabierakowego czoła cewek uzwojenia wzbudzenia są chłodzone strugami wodoru przepływającymi w kanałach osiowych w przewodach o przekroju prostokątnym (bez kanałów na powierzchniach bocznych zewnętrznych), zaś części żłobkowe cewek są chłodzone strugami wodoru przepływającymi w kanałach promieniowo-osiowych usytuowanych na zewnętrznych powierzchniach bocznych przewodów (bez kanałów wewnętrznych osiowych).

W polskim systemie elektroenergetycznym najbardziej popularnym pod względem liczebności jest generator typu TWW-200-2 o mocy 200 MW. W znanym generatorze typu TWW-200-2 dwa wentylatory osiowe (ssące) wyciągają wodór ze szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem, kierują go w strefę połączeń czołowych uzwojeń stojana, następnie strumień wodoru przepływa do chłodnic, gdzie po ochłodzeniu kierowany jest do stojana i wirnika generatora. Standardowo generatory typu TWW-200-2 wyposażone są fabrycznie w zabierakowy system chłodzenia wirnika, jednak znane są też modernizacje polegające na ich zamianie na systemy chłodzenia osiowego. Znane są różne projekty modernizacji tego typu generatorów, których celem było podwyższenie mocy generatora, co wymagało przede wszystkim udoskonalenia konstrukcji oraz systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia, które jest najbardziej wykorzystanym pod względem cieplnym elementem generatora.

Znane są między innymi rozwiązania modernizacyjne generatorów typu TWW-200-2 polegające na zastosowaniu:

– zabierakowego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia z wprowadzonymi dodatkowymi profilowanymi przewodami na dnie żłobków wirnika (w miejscu przekładek izolacyjnych zastosowanych w generatorze fabrycznym) (patent PL 174625),

– osiowego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia z podżłobkami wentylacyjnymi (patent PL 189634),

– osiowego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia bez podżłobków wentylacyjnych (patent PL 168834).

Niektóre ze znanych dotychczas rozwiązań umożliwiały podwyższenie mocy generatora TWW-200-2 z 200 MW do maksymalnie 240 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy $\cos\varphi_n$ = 0,85 indukcyjny. Układ z osiowym systemem chłodzenia wirnika generatora TWW-200-2 bez podżłobka wentylacyjnego zezwala na stosowanie gęstości prądu w uzwojeniu wzbudzenia rzędu 7,5 A/mm^2. Układ chłodzenia z zabierakowym systemem chłodzenia wirnika generatora TWW-200-2 zezwala na stosowanie gęstości prądu w uzwojeniu wzbudzenia rzędu 9,5 A/mm^2. Podobne, graniczne wartości gęstości prądu w uzwojeniu wzbudzenia można stosować w innych znanych turbogeneratorach serii TWW z zabierakowym systemem chłodzenia wirnika, w tym turbogeneratorach o mocy 320 MW i 500 MW.

Celem twórców wynalazku było zaprojektowanie takiej konstrukcji układu chłodzenia wirnika turbogeneratora, która umożliwi dalszą poprawę intensywności jego chłodzenia, a w konsekwencji znaczne zmniejszenie jego przyrostu temperatury, co pozwoli zwiększyć dopuszczalną gęstość prądu wzbudzenia turbogeneratora i przyczyni się do zwiększenia jego mocy.

Układ chłodzenia wirnika turbogeneratora, według wynalazku, z bezpośrednim systemem chłodzenia za pomocą gazowego medium chłodzącego, zwłaszcza wodoru lub powietrza jest układem hybrydowym, bez podżłobków, powstałym w wyniku połączenia bazowej sieci kanałów wentylacyjnych systemu zabierakowego z uzupełniającą siecią kanałów wentylacyjnych systemu osiowego (bez podżłobka), umożliwiającym zwiększenie mocy turbogeneratora. Wirnik ma uzwojenie wzbudzenia składające się ze zwojów oddzielonych od siebie izolacją międzyzwojową i umieszczonych w żłobkach, które wykonane są wzdłuż całej długości beczki wirnika, promieniowo rozmieszczone na jej obwodzie i wyłożone izolacją żłobkową a każdy żłobek zamknięty jest od góry klinem żłobkowym z zabierakami zabudowanymi naprzemiennie w kierunku natarcia oraz przeciwnym. Układ charakteryzuje się tym, że wyposażony jest jednocześnie w zabierakowy system chłodzenia z zewnętrznymi promieniowo-osiowymi kanałami wentylacyjnymi wykonanymi na powierzchni bocznej przewodów uzwojenia wzbudzenia ukośnie do ich osi podłużnej, biegnącymi w części prostej żłobkowej wirnika oraz w osiowy system chłodzenia z kanałami chłodzącymi usytuowanymi wewnątrz przewodów uzwojenia wzbu-

dzenia, wzdłuż ich osi. Wewnętrzne osiowe kanały wentylacyjne wykonane są na całej długości zwoi i dzielą się na kanały krótkie biegnące od otworów wlotowych czynnika chłodzącego usytuowanych na łukach połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia do otworów wylotowych usytuowanych na środku połączeń czołowych oraz na kanały długie biegnące od otworów wlotowych czynnika chłodzącego wykonanych na łukach połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia aż do strefy środkowej beczki wirnika, gdzie łączą się z kanałami promieniowo-osiowymi systemu zabierakowego. Jest to istotna różnica w stosunku do znanego systemu zabierakowego, w którym osiowe kanały wentylacyjne kończyły się w pierwszej strefie wylotowej beczki wirnika.

Korzystnie, zewnętrzne promieniowo-osiowe kanały wentylacyjne mają przekrój prostokątny lub zaokrąglony.

Korzystnie, wewnętrzne osiowe kanały wentylacyjne mają w przekroju poprzecznym kształt fasolowy lub eliptyczny lub kołowy. Taki kształt jest korzystny ze względu na jego wytrzymałość mechaniczną podczas wykonywania łuków połączeń czołowych oraz lepsze właściwości wentylacyjne wynikające ze zmniejszenia oporów przepływu medium chłodzącego.

Układ chłodzenia wirnika turbogeneratora z hybrydowym zabierakowo-osiowym systemem chłodzenia, według wynalazku, pozwala na stosowanie gęstości prądu w uzwojeniu wzbudzenia rzędu 12 A/mm2. W porównaniu do stosowanych dotychczas systemów, zwłaszcza w zmodernizowanych generatorach typu TWW-200-2 o mocy 200 MW (ale i większych) jest to największa dopuszczalna gęstość prądu wzbudzenia.

Zastosowanie takiego układu umożliwia istotną poprawę intensywności chłodzenia uzwojenia wzbudzenia, a w konsekwencji znaczne zmniejszenie jego przyrostu temperatury. Układ umożliwia zatem znaczne podwyższenie mocy turbogeneratora przy jednoczesnym dużym zwiększeniu żywotności układu izolacyjnego wirnika w wyniku obniżenia jego temperatury.

Z obliczeń pola przyrostu temperatury w uzwojeniu wzbudzenia różnych typów turbogeneratorów wynika, że zarówno przy zabierakowym, jak i osiowym systemie chłodzenia największy przyrost temperatury występuje w przewodach uzwojenia wzbudzenia w środku beczki wirnika. Zastosowanie zatem w systemie hybrydowym w części żłobkowej cewek uzwojenia wzbudzenia jednocześnie dwóch sieci kanałów chłodzących: zewnętrznych promieniowo-osiowych (na powierzchni bocznej przewodów) oraz wewnętrznych osiowych (wewnątrz przewodów), znacznie zwiększa skuteczność odprowadzania ciepła w tej najbardziej nagrzewającej się strefie cewek uzwojenia. W konsekwencji powoduje to nie tylko obniżenie średniego, ale również i maksymalnego przyrostu temperatury uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora. Dodatkowo skutkuje to zmniejszeniem przyrostu temperatury wodoru na wypływie z kanałów osiowych w części środkowej beczki wirnika. Zapobiega to nadmiernemu nagrzewaniu pakietu rdzenia i uzwojenia stojana w strefie wylotu gorącego wodoru z otworów w środku beczki wirnika, jakie można zaobserwować podczas wykonywania pomiarów cieplnych turbogeneratora wyłącznie z osiowym systemem chłodzenia uzwojenia wzbudzenia bez podżłobków.

Z przeprowadzonej jakościowej oceny hybrydowego zabierakowo-osiowego systemu chłodzenia według wynalazku wynika, że pod wieloma względami takie rozwiązanie konstrukcyjne wpływa korzystnie na stan cieplny uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora, powodując zmniejszenie:

– średniego przyrostu temperatury przewodów (w konsekwencji wzrasta dopuszczalna gęstość prądu wzbudzenia limitowana średnim przyrostem temperatury uzwojenia wzbudzenia),

– maksymalnego przyrostu temperatury przewodów (w konsekwencji wzrasta żywotność układu izolacyjnego uzwojenia wzbudzenia),

– nierównomierności rozkładu przyrostu temperatury w przewodach (w efekcie powodując zmniejszenie naprężeń wywołanych nierównomiernym nagrzewaniem się cewek uzwojenia),

– przyrostu temperatury gorącego wodoru wypływającego w środku beczki wirnika, powodującego lokalne przegrzania rdzenia i uzwojenia stojana w strefie wylotowej wirnika.

Reasumując, układ chłodzenia wirnika turbogeneratora, według wynalazku, pozwala w stosunku do rozwiązań wcześniejszych na dalsze obniżenie w trakcie pracy maszyny temperatury uzwojenia wirnika (zazwyczaj najbardziej wykorzystanego cieplnie elementu turbogeneratora), co tym samym stwarza możliwość zwiększenia mocy turbogeneratora przy utrzymaniu dotychczasowych wymiarów wirnika oraz zachowaniu znamionowego współczynnika mocy turbogeneratora.

Przedmiot wynalazku, w przykładzie wykonania jest przedstawiony na rysunku, na którym fig. 1 uwidacznia schemat układu chłodzenia wirnika turbogeneratora z hybrydowym systemem chłodzenia, fig. 2 – wycinek jednego zwoju uzwojenia wzbudzenia wirnika turbogeneratora z hybrydowym syste-

mem chłodzenia w części prostej żłobkowej, natomiast fig. 3 – przekrój żłobka wirnika turbogeneratora z hybrydowym systemem chłodzenia.

P r z y k ł a d

Wirnik 1 turbogeneratora typu TWW-200-2 o mocy znamionowej 200 MW, z bezpośrednim wodorowym systemem chłodzenia ma uzwojenie wzbudzenia składające się ze zwojów o przekroju prostokątnym, oddzielonych od siebie izolacją międzyzwojową 2 i umieszczonych w żłobkach, które wykonane są wzdłuż całej długości beczki wirnika 1, promieniowo rozmieszczone na jej obwodzie i wyłożone izolacją żłobkową 3, a każdy żłobek zamknięty jest od góry klinem żłobkowym 4 z zabierakami zabudowanymi naprzemiennie w kierunku natarcia oraz przeciwnym i izolacją podklinową 5. Układ wyposażony jest jednocześnie w zabierakowy system chłodzenia z zewnętrznymi promieniowo-osiowymi kanałami wentylacyjnymi 6 wykonanymi na powierzchni bocznej przewodów 7 uzwojenia wzbudzenia ukośnie do ich osi podłużnej, biegnącymi w części prostej żłobkowej wirnika 1 oraz w osiowy system chłodzenia z kanałami chłodzącymi 8 usytuowanymi wewnątrz przewodów 7 uzwojenia wzbudzenia, wzdłuż ich osi. Wewnętrzne osiowe kanały wentylacyjne 8 wykonane są na całej długości zwoi i dzielą się na kanały krótkie 8a biegnące od otworów wlotowych 9 czynnika chłodzącego usytuowanych na łukach połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia do otworów wylotowych 10 usytuowanych na środku połączeń czołowych oraz na kanały długie 8b biegnące od odrębnych otworów wlotowych 11 czynnika chłodzącego wykonanych na łukach połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia aż do strefy środkowej beczki wirnika 1, gdzie łączą się z kanałami promieniowo-osiowymi 6 systemu zabierakowego. Zewnętrzne promieniowo-osiowe kanały wentylacyjne 6 mają przekrój prostokątny, natomiast wewnętrzne osiowe kanały wentylacyjne 8 mają w przekroju poprzecznym kształt fasolowy.

W układzie każda cewka uzwojenia wzbudzenia w części prostej żłobkowej chłodzona jest dwoma niezależnymi strugami medium chłodzącego. Jedna struga medium chłodzącego (w systemie zabierakowym) pobierana i wyprowadzana jest do szczeliny stójan-wirnik w poszczególnych strefach beczki wirnika 1 za pomocą otworów w klinach żłobkowych 4 zabierakowych zabudowanych naprzemiennie w kierunku natarcia oraz przeciwnym. Medium chłodzące opływa przewód 7 uzwojenia wzbudzenia płynąc w zewnętrznych ukośnie wykonanych kanałach promieniowo-osiowych 6. Druga struga medium chłodzącego (w systemie osiowym) płynie wewnątrz przewodu 7 uzwojenia wzbudzenia, wpływa otworami wlotowymi 11 umieszczonymi na łukach połączeń czołowych, przepływa kanałami osiowymi 8b w przewodach 7 aż do środka beczki wirnika 1, gdzie łączy się ze strugą medium chłodzącego z systemu zabierakowego i wypływa kanałami promieniowo-osiowymi 6 i otworami w klinach żłobkowych 4 z zabierakami do szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem. W czołach cewek uzwojenia wzbudzenia płynie niezależna struga medium chłodzącego, która wpływa do kanałów osiowych 8a w przewodach 7 otworami 9 usytuowanymi na łukach połączeń czołowych cewek zaś wypływa otworami wylotowymi 10 w środku połączeń czołowych.

Zastrzeżenia patentowe

1. Układ chłodzenia wirnika turbogeneratora z bezpośrednim systemem chłodzenia, za pomocą gazowego medium chłodzącego, zwłaszcza wodoru lub powietrza, umożliwiający zwiększenie mocy turbogeneratora, w którym wirnik ma uzwojenie wzbudzenia składające się ze zwojów oddzielonych od siebie izolacją międzyzwojową i umieszczonych w żłobkach, które wykonane są wzdłuż całej długości beczki wirnika, promieniowo rozmieszczone na jej obwodzie i wyłożone izolacją żłobkową, a każdy żłobek zamknięty jest od góry klinem żłobkowym z zabierakami zabudowanymi naprzemiennie w kierunku natarcia oraz przeciwnym **znamienny tym**, że wyposażony jest jednocześnie w zabierakowy system chłodzenia z zewnętrznymi promieniowo-osiowymi kanałami wentylacyjnymi (6) wykonanymi na powierzchni bocznej przewodów (7) uzwojenia wzbudzenia, ukośnie do ich osi podłużnej, biegnącymi w części prostej żłobkowej wirnika (1) oraz w osiowy system chłodzenia z kanałami chłodzącymi (8) usytuowanymi wewnątrz przewodów (7) uzwojenia wzbudzenia, wzdłuż ich osi, przy czym wewnętrzne osiowe kanały wentylacyjne (8) wykonane są na całej długości zwoi i dzielą się na kanały krótkie (8a) biegnące od otworów wlotowych (9) czynnika chłodzącego usytuowanych na łukach połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia do otworów wylotowych (10) usytuowanych na środku połączeń czołowych oraz na kanały długie (8b) biegnące od odrębnych otworów wlotowych (11) czynnika chłodzącego wykonanych na łukach połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia aż do strefy środkowej beczki wirnika (1), gdzie łączą się z kanałami promieniowo-osiowymi (6) systemu zabierakowego.

2. Układ według zastrz. 1, **znamienny tym**, że zewnętrzne promieniowo-osiowe kanały wentylacyjne (6) mają przekrój prostokątny lub zaokrąglony.

3. Układ według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wewnętrzne osiowe kanały wentylacyjne (8) mają w przekroju poprzecznym kształt fasolowy.

4. Układ według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wewnętrzne osiowe kanały wentylacyjne (8) mają w przekroju poprzecznym kształt eliptyczny.

5. Układ według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wewnętrzne osiowe kanały wentylacyjne (8) mają w przekroju poprzecznym kształt kołowy.

Rysunki

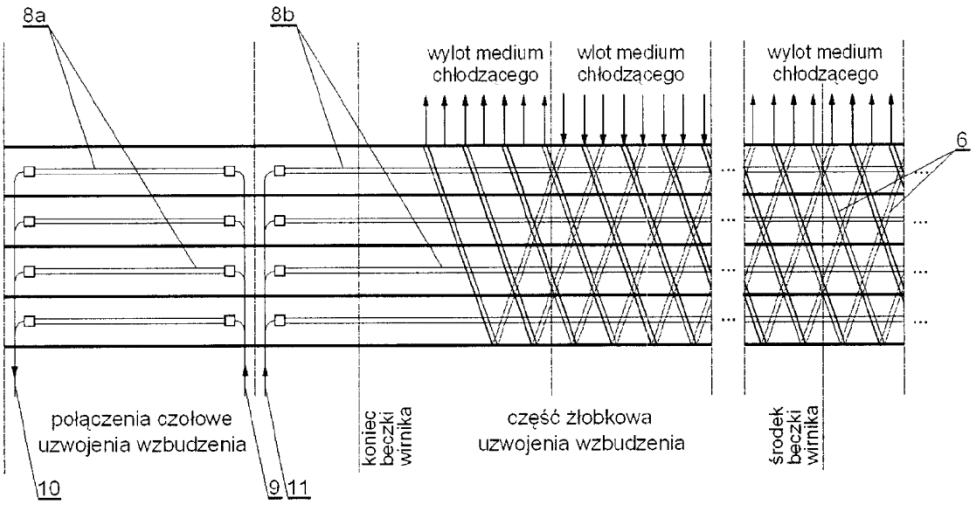

Fig.1

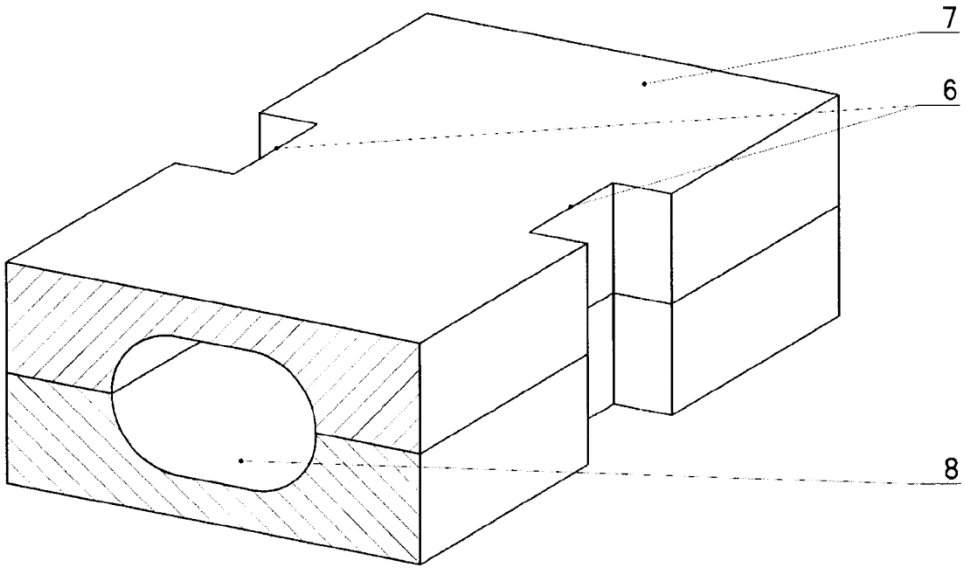

Fig. 2

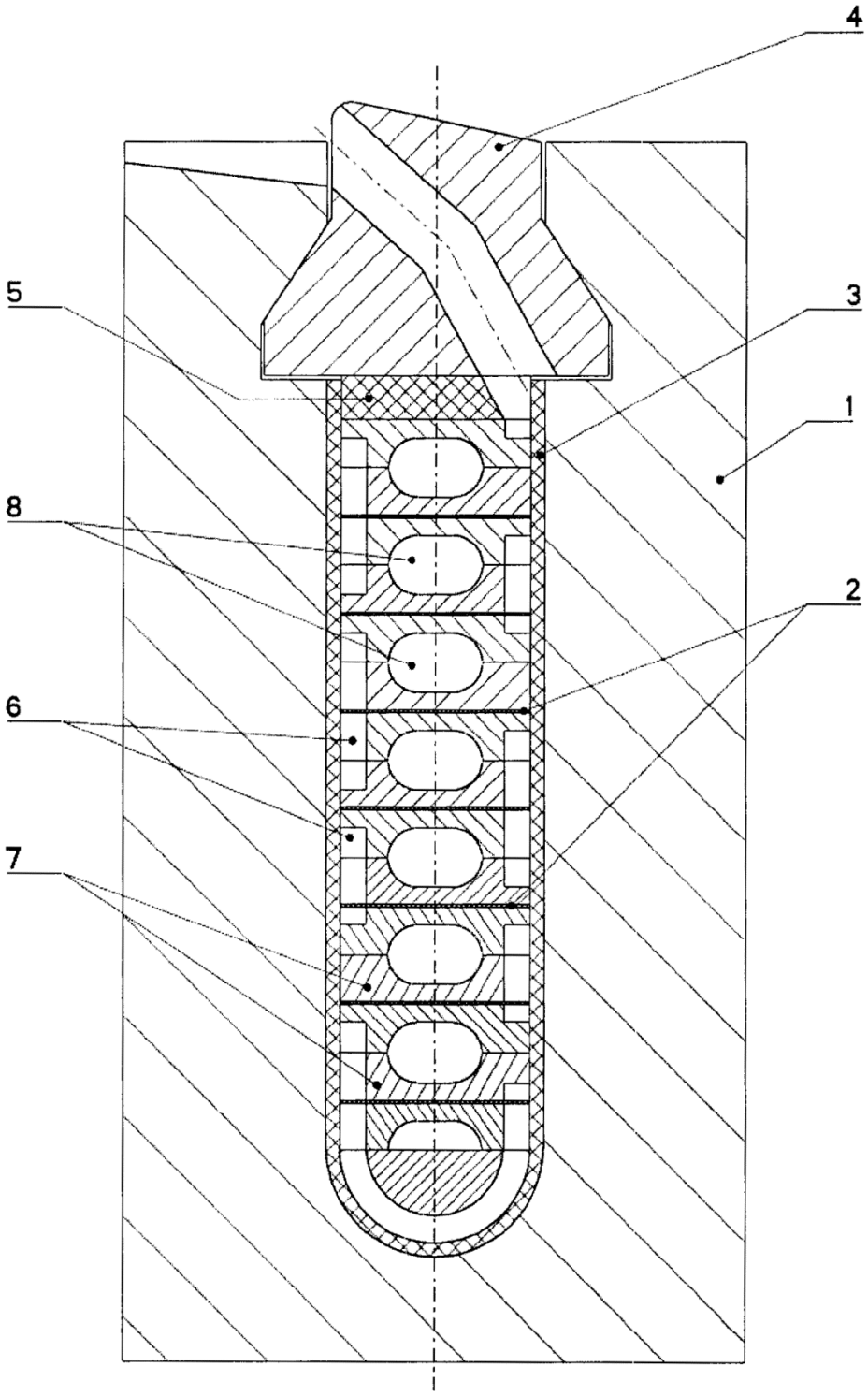

Fig. 3

Rysunek dotyczący dotychczasowego stanu techniki

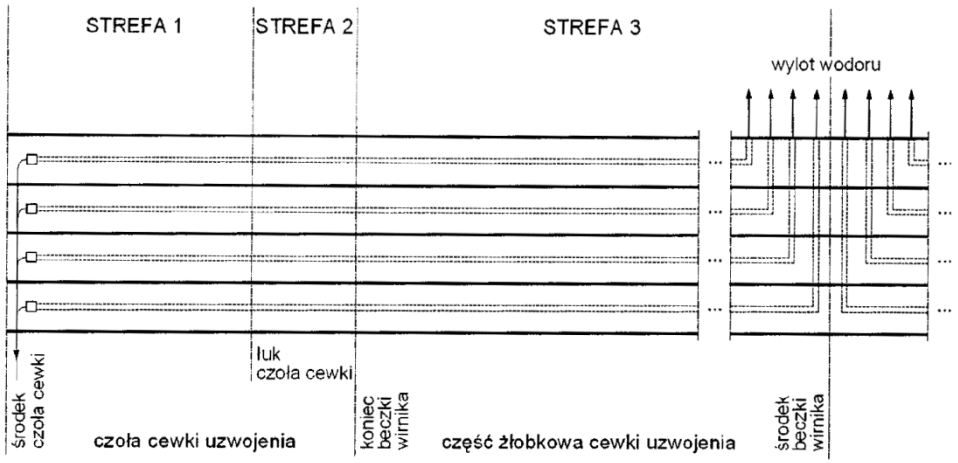

Fig. 4. Schemat uzwojenia wzbudzenia z osiowym systemem chłodzenia.

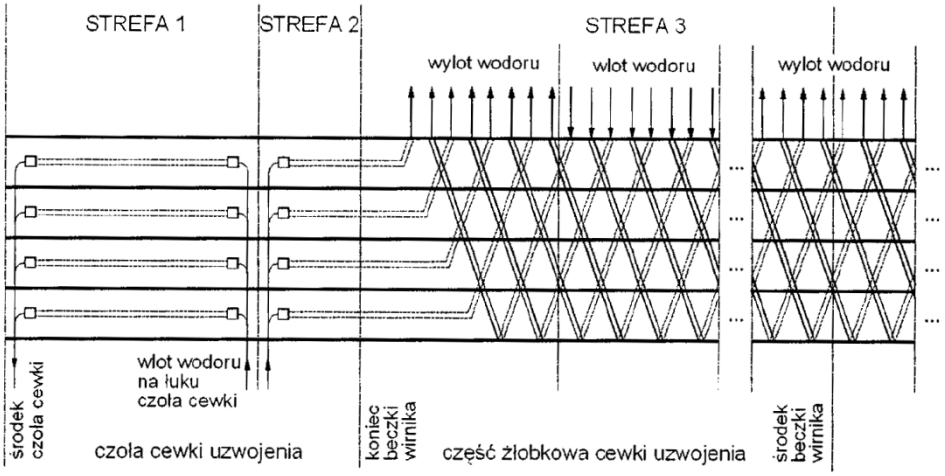

Fig. 5. Schemat uzwojenia wzbudzenia z zabierakowym systemem chłodzenia.

Departament Wydawnictw UPRP
Cena 2,46 zł (w tym 23% VAT)