



ÚŘAD PRO VYNÁLEZY
A OBJEVY

POPIS VYNÁLEZU K PATENTU

203114

(11) (B2)

(51) Int. Cl.³
H 02 K 3/24

(22) Přihlášeno 04 02 76
(21) (PV 685-76)

(40) Zveřejněno 30 05 80

(45) Vydáno 15 12 83.

(72) Autor vynálezu WALLENSTEIN MIHÁLY ing., BUDAPEŠŤ (MLR)
(73) Majitel patentu GANZ VILLAMOSSÁGI MŰVEK, BUDAPEŠŤ (MLR)

(54) Plynem chlazený elektrický stroj točivý, zejména vysokootáčkový vysoko-
výkonový synchronní stroj

1

Vynález se týká plynem chlazeného elektrického stroje točivého, zejména vysokootáčkového vysokovýkonového synchronního stroje, s přímo chlazeným vinutím rotoru, jehož chladicí kanály leží na válcové ploše souosé s osou rotoru, přičemž každý vodič vinutí rotoru je ve spojení jednak s radiálně probíhajícími prvními vtokovými kanály ústícími ve vzduchové mezeře vtokovými otvory našikmenými ve směru otáčení rotoru, jednak s radiálně probíhajícími výtokovými kanály ústícími ve vzduchové mezeře výtokovými otvory našikmenými proti směru otáčení rotoru a jehož vodiče, seskupené v každé drážce vinutí do radiálně vnější skupiny vodičů a do radiálně vnitřní skupiny vodičů, leží v oddělených proudcích chladicího plynu, přičemž první vtokové otvory a výtokové otvory jsou v axiálním směru rotoru uspořádány periodicky.

Přímé chlazení elektrických strojů o velmi vysokém výkonu, řádově několik set megawattů, s vysokými otáčkami, s rotorovým vinutím napájeným stejnosměrným proudem, zejména dvou-
pólových synchronních strojů s válcovým rotorem - turbogenerátorů se zajišťuje chlazením plynem nebo chlazením kapalinou.

U vyšších výkonů se chlazení plynem provádí zpravidla pomocí vodíku, jehož přednosti jsou malá specifická váha, malá ztráta vznikající třením plynu, poměrně velké specifické teplo, dobrá elektrická izolační schopnost a tak dále.

Konstruktéři usilující konstruovat stroje se stále větším jednotkovým výkonem mají volbu mezi dvěma základními typy přímého chlazení vodičů, a to mezi chlazením kapalinou a chlazením plynem. Tato volba není vůbec jednoduchá. Pro chlazení plynem svědčí skutečnost, že toto řešení má jak u výrobců, tak i u spotřebitelů tradici několika desetiletí, je však otázkou, zda je možné intenzitu chlazení plynem ještě zvýšit v rozsahu, jak by bylo žádouc-

no při stoupajících požadavcích. Pro druhou alternativu svědčí skutečnost, že kapalina má značně velké specifické teplo a teplotní vodivost. Aby bylo možno využít těchto výhod, je však nutno vyřešit rozmanité nové konstrukční a technologické problémy a problémy bezpečnosti provozu, například zvýšení počtu paralelních cest kapaliny, těsnění chladicího systému a tak dále, popřípadě je nutno přijmout riziko spojené s neúplným vyřešením těchto problémů.

V současné době je cílem zvýšení jednotkového výkonu dvoupólových turbogenerátorů z 500 až 1 000 MW na 1 000 až 2 000 MW, je otázka, zda je možno dalším vývojem tradičního chlazení vodíkem vyřešit s tím související úkoly ventilační techniky, nebo zda je nevyhnutelný přechod k chlazení kapalinou a s tím spojeným rizikům.

Při zkoumání této otázky je třeba se krátce zmínit o tom, že používané varianty nejintenzivnějšího chlazení rotorů velkých turbogenerátorů vodíkem je možno rozdělit ve dvě skupiny. Toto rozdělení se opírá o to, na kterém místě vstupuje do rotoru plyn chladicí největší část vinutí, to jest část vinutí uloženou v železném tělese. Chladicí plyn totiž opouští u obou skupin rotor stejným způsobem, a sice na povrchu jeho pláště ve směru odpovídajícím odstředivé síle, to jest radiálně.

U první skupiny vstupuje chladicí plyn do rotoru na jeho čelech v axiálním směru, načež proudí buď kanály vytvořenými ve vodičích samotných nebo kanály vytvořenými v železném tělese rotoru pod drážkami vinutí v axiálním směru a poté se obrací ve směru radiálním a opouští rotor, přičemž je v dotyku s vinutím. V tomto případě je pro proudění chladicího plynu charakteristický axiální směr. Tyto systémy budou proto dále nazývány axiálními.

U druhé skupiny vstupuje chladicí plyn do rotoru povrchem pláště, proudí v radiálním směru dovnitř, pak přichází do styku s ochlazovanými vodiči, přičemž proudí směrem axiálním nebo tangenciálním, popřípadě směrem, který má axiální a tangenciální složky a konečně opouští rotor, když se opět obrátí do radiálního směru. Pro tento systém, který bude dále nazýván systémem se vstupem ve vzduchové mezeře, je charakteristickým proudění v radiálním směru.

Stupeň využití rotoru chlazeného vodíkem závisí v rozhodující míře na tom, kolik plynu je možno přivést do rotoru v jednotce času. V případě většího množství plynu je totiž oteplení plynu při dané ztrátě (I^2R) menší, popřípadě je pokles teploty na chlazeném povrchu vodičů menší, důsledkem čehož je menší i oteplení vinutí ve srovnání s teplotou chlazeného chladicího plynu. To je nakonec klíčovou otázkou při konstrukci stroje o velmi vysokém výkonu.

Podle zkušeností je množství plynu přiváděné do rotoru přibližně úměrné D^2 u systému axiálního a $D \cdot L$ u systému se vstupem ve vzduchové mezeře, kde D je průměr rotoru, L aktivní délka železného tělesa.

Vzhledem k tomu musí být u axiálního systému železné těleso rotoru krátké a většího průměru, kdežto u systému se vstupem ve vzduchové mezeře se množství přiváděného plynu zvyšuje úměrně s délkou železného tělesa, zatímco tedy délka rotoru je omezena axiálním prouděním - ztráty prouděním se zvyšují se zvětšující se délkou průtokového kanálu, vstupní průřez na čele je poměrně malý, - omezuje u systému se vstupem ve vzduchové mezeře poměrně malý průřez vstupních a výstupních otvorů, vytvořených na plášti rotoru obvykle v drážkových klínech, jimiž je vinutí připevněno, množství chladicího prostředí, které může protéci rotorem.

Koneckonců je tedy využitelnost rotoru u známých řešení, jak u systému axiálního, tak i u systému se vstupem ve vzduchové mezeře, omezena, jelikož je omezeno i samotné množství plynu, které je možno přivést. Maximální jednotkový výkon, jehož je možno dosáhnout u známých řešení, například u dvoupólových turbogenerátorů, je u největšího průměru rotoru při-

pustného z hlediska pevnosti asi 1 250 mm asi 1 000 až 1 200 MW. Jak již bylo uvedeno, je délka železného tělesa u axiálního systému omezena, ježto postačujícího axiálního chlazení lze dosáhnout pouze u délky nanejvýše $L = 3 \sim 4 D$. Průměr rotoru však nelze se zřetelem na jeho pevnost zvyšovat nad určitou hranici, takže množství přiváděného plynu je možno zvýšit pouze prodloužením železného tělesa. Délka železného tělesa u vysokovýkonového stroje by měla být alespoň $L = 6 \sim 8 D$, tak dlouhý rotor však není možno při použití axiálního systému úspěšně chladit.

Podstata systému se vstupem ve vzduchové mezeře záleží v tom, že mezi vstupním a výstupním otvorem, vytvořenými v plášti rotoru, vzniká tlakový rozdíl jako výsledek otáčení - dynamický tlak a sání, - umožňující vstup chladicího plynu do rotoru. Ježto odstředivá síla má zásadně stejný účinek jak ve vstupním tak i výstupním kanálu, měly by se tyto dva účinky podle principu kontinuity vzájemně kompenzovat. V praxi je ale plyn vstupující do rotoru podstatně chladnější a má proto větší specifickou váhu než plyn vystupující z rotoru. Proto působí na plyn ve vstupním kanálu větší odstředivá síla než ve výstupním kanálu. Tento jev máří intenzitu chlazení a sice v míře tím větší, čím je větší rozdíl mezi teplotou plynu vstupujícího a vystupujícího a čím hlubší je drážka vinutí.

Je proto jasné, že u známých systémů axiálního a se vstupem ve vzduchové mezeře lze dosáhnout dobrého chlazení pouze u strojů s určitými rozměry - s určitým výkonem, - ježto u prvního systému je omezena délka drážky (železného tělesa), u druhého systému je omezena hloubka drážky.

Cílem vynálezu je vytvoření chladicího systému pro točivý elektrický stroj, zvláště pro rychloběžný vysokovýkonový synchronní stroj s válcovým rotorem, jímž by bylo možno chladit stroje větších rozměrů - výkonů - účinněji, než je tomu u strojů dosavadních a který by učinil u strojů a výkonem 1 000 až 2 000 MW přechod na chlazení kapalinou zbytečným.

Vytčeného cíle je dosaženo a uvedené nevýhody jsou odstraněny u plynem chlazeného elektrického stroje točivého podle vynálezu tím, že na dně každé drážky vinutí je vytvořena ventilační drážka vyúsťující na obou čelních stranách rotoru, ventilační drážka je ve spojení se všemi prvními vtokovými kanály drážka vinutí alespoň nepřímo přes část chladicích kanálů radiálně vnitřní skupiny vodičů a chladicí kanály drážky vinutí jsou ve spojení se všemi výtakovými kanály téže drážky vinutí.

U zvláště výhodného provedení plynem chlazeného elektrického stroje točivého podle vynálezu, u něhož chladicí kanály jsou uspořádány tangenciálně, alespoň jeden chladicí kanál radiálně vnitřní skupiny vodičů je spojen radiálně probíhajícími druhými vtokovými kanály, uspořádanými ve středové axiální rovině drážek vinutí a ventilační drážka a první vtokové kanály a výtakové kanály jsou uspořádány na protilehlých bočních stěnách drážky vinutí.

Je výhodné, když druhé vtokové kanály sahají alespoň k chladicímu kanálu ležícímu jako druhý nejbližší k ose rotoru.

U jiného výhodného provedení plynem chlazeného elektrického stroje točivého podle vynálezu, u něhož chladicí kanály jsou uspořádány axiálně a první vtokové kanály, radiálně probíhající druhé vtokové kanály, spojující alespoň jeden chladicí kanál radiálně vnitřní skupiny vodičů s ventilační drážkou a výtakové kanály jsou uspořádány v odstupu od sebe ve středové axiální rovině drážky vinutí, jsou první vtokové kanály a druhé vtokové kanály spojeny s ventilační drážkou.

Největší výhoda řešení podle vynálezu záleží v tom, že systémem se vstupem ve vzduchové mezeře lze poměrně malým protitlakem chladit i vodiče, které jsou vzdálenější od osy a že množství plynu potřebné u axiálního chladicího systému k chlazení vodičů ležících blíže k ose je možno přivést bez obtíží čelem rotoru.

Dále bude vynález popsán na příkladech provedení znázorněných na přiložených výkresech, na nichž znázorňuje obr. 1 řez válcovým rotorem synchronního stroje rovinou kolmou k ose při použití tangenciálně nasměrovaných chladicích kanálů, obr. 2 lomený řez rotorem rovinou II-II na obr. 1, obr. 3 řez rotorem synchronního stroje rovinou kolmou k ose při použití axiálně nasměrovaných kanálů a obr. 4 lomený řez rotorem rovinou IV-IV na obr. 3.

U příkladu provedení znázorněného na obr. 1 a 2 jsou v železném tělese 1 rotoru synchronního stroje s válcovým rotorem vytvořeny drážky 2 vinutí. Pod drážkami 2 vinutí jsou vytvořeny ventilační drážky 3 související s drážkami 2 vinutí, probíhající rotorem v axiálním směru a otevřené na čelech rotoru. V drážkách 2 vinutí jsou uspořádána vinutí sestávající z radiálně vnější skupiny 8 a radiálně vnitřní skupiny 9 vodičů 20.

Radiálně vnější skupina 8 vodičů 20 a radiálně vnitřní skupina 9 vodičů 20 jsou v axiálním směru uspořádány v drážkách 2 vinutí vzájemně rovnoběžně. Vždy jeden vodič 20 vnější skupiny 8 a jeden vodič 20 vnitřní skupiny 9 tvoří jedno vinutí. Vinutí jsou od sebe oddělena mezilehlou izolací 17. Na dně a v horní části drážek 2 vinutí jsou uspořádány horní izolace 5 a dolní izolace 6 a podél jejich stěn je boční izolace 7. V bočních izolacích 7 jsou vytvořeny první vtokové kanály 10 a výtokové kanály 11, které jsou ve spojení s tangenciálními chladicími kanály 14, vytvořenými ve vodičích 20 radiálně vnější skupiny 8 a ve vodičích 20 radiálně vnitřní skupiny 9.

Vodiče 20 vnitřní skupiny 9 jsou v rovině souměrnosti drážky 2 vinutí protínány druhými vtokovými kanály 16 spojujícími ventilační drážku 3 s chladicími kanály 14. Ústí drážky 2 vinutí je uzavřeno drážkovým klínem 4, v němž jsou vytvořeny vtokové otvory 12 a výtokové otvory 13. Vtokové otvory 12 a výtokové otvory 13 jsou vzhledem k radiálnímu směru uspořádány šikmo a sice tak, že vtokové otvory 12 jsou zešikmeny ve směru otáčení, výtokové otvory 13 ve směru proti směru otáčení.

Směr proudění chladicího plynu je na obr. 1 a 2 označen šipkami. Vstupuje tedy chladicí plyn do drážky 2 vinutí ventilační drážkou 3 a vtokovými otvory 12. Ze vtokových otvorů 12 proudí chladicí plyn do kanálů vytvořených podél jedné stěny drážky 2 vinutí, poté do tangenciálních chladicích kanálů 14 načež chladicí plyn proudí do radiálních výtokových kanálů 11, vytvořených v druhé stěně drážky 2 vinutí a nakonec chladicí plyn proudí výtokovými otvory 13 z rotoru zpět do vzduchové mezery synchronního stroje.

Z ventilační drážky 3 proudí chladicí plyn druhými vtokovými kanály 16 do tangenciálních chladicích kanálů 14, odtud přímo, popřípadě prvními vtokovými kanály 10 probíhajícími podél jedné boční stěny drážky 2 vinutí a chladicími kanály 14 a výtokovými kanály 11 vytvořenými podél druhé boční stěny drážek 2 vinutí a nakonec chladicí plyn proudí výtokovými otvory 13 do vzduchové mezery synchronního stroje.

Z toho, co bylo shora uvedeno, je zřejmé, že se vodiče 20 radiálně vnější skupiny 8 chladí systémem se vstupem ve vzduchové mezeře, vodiče 20 radiálně vnitřní skupiny 9 systémem axiálního chlazení.

Provedení podle obr. 1 a 2 má tu výhodu, že průřez prvních vtokových kanálů 10 a výtokových kanálů 11, vzhledem k tomu, že drážka 2 vinutí má tvar lichoběžníku, se zvětšují čím se množstvím vedeného plynu rovněž zvětšuje.

U provedení podle obr. 3 a 4 není podél bočních stěn drážky 2 vinutí uspořádán žádný chladicí kanál a chladicí kanály 14 mezi radiálně vnější skupinou 8 a radiálně vnitřní skupinou 9 vodičů 20 nemají směr tangenciální, nýbrž axiální. Chladicí kanály 14, probíhají radiálně vnější skupinou 8 a radiálně vnitřní skupinou 9 vodičů 20 ve směru axiálním. Spojení mezi ventilační drážkou 3 a radiálně vnitřní skupinou 9 vodičů 20 je zajištěno, podobně jako u předcházejícího příkladu, druhými vtokovými kanály 16, z nichž však pouze každý druhý ústí přímo do ventilační drážky 3, ostatní dosahují pouze k nejvnitřnějšímu chladi-

címu kanálu 14 a tímto jsou spojeny s ventilační drážkou 3. Spojení mezi chladicími kanály 14 radiálně vnější skupiny 8 vodičů 20 a vzduchovou mezerou synchronního stroje, popřípadě mezi vtokovými otvory 12 a výtokovými otvory 13, je u tohoto provedení zajištěno prvními vtokovými kanály 10 a výtokovými kanály 11, které jsou podobné druhým vtokovým kanálům 16 a mají s nimi společnou osu.

První vtokové kanály 18 a výtokové kanály 19 jsou střídavě spojeny s vtokovými otvory 12 a výtokovými otvory 13, a sice tak, že výtokový kanál 19, spojený s výtokovým otvorem 13, je přímo spojen s druhým vtokovým kanálem 16, který má s ním společnou osu, kdežto spojení prvního vtokového kanálu 18, spojeného s vtokovým otvorem 12 s druhým vtokovým kanálem 16, který má s ním společnou osu, je přerušeno v bodě "A".

Směr proudění chladicího plynu je i na obr. 3 a 4 označeno šipkami. Z ventilační drážky 3 proudí chladicí plyn do druhých vtokových kanálů 16, které jsou dole otevřeny, načež chladicí plyn proudí chladicími kanály 14 ve směru sousedících druhých vtokových kanálů 16. Druhé vtokové kanály 16 jsou spojeny s výtokovými kanály 19, jimiž proudí chladicí plyn do výtokových otvorů 13 a z těchto do vzduchové mezery. Chladicí plyn, vstupující do vtokových otvorů 12, proudí do prvního vtokových kanálů 10, poté chladicími kanály 14 do sousedících výtokových kanálů 11 a z těchto výtokovými otvory 13 opět do vzduchové mezery.

Vodiče 20 radiálně vnější skupiny 8 jsou chlazeny systémem se vstupem ve vzduchové mezeře, vodiče 20 radiálně vnitřní skupiny 9 systémem axiálním. Vzhledem k tomu, že spojení mezi druhými vtokovými kanály 16 a prvními vtokovými kanály 10 je v bodě "A" přerušeno, jsou chladicí systémy vodičů 20 radiálně vnější skupiny 8 a radiálně vnitřní skupiny 9 na sobě vzájemně zcela nezávislé a chladicí plyn proudící oběma systémy se směšuje pouze u výstupu.

Konstrukční oddělení obou systémů není bezpodmínečně nutné. Je-li v bodě "A" průchod, dochází přesto k oddělení přirozeným způsobem, hraniční čára mezi oběma systémy však nebude bezpodmínečně u středních vodičů 20, ale bude ležet - v závislosti na tlakových poměrech - buď pod středními vodiči 20, nebo nad nimi.

Popsaná dvě provedení jsou pouze příklady, jejichž účelem je lepší porozumění vynálezu. Na základě toho, co bylo shora uvedeno, je možno zkonstruovat četná další provedení, aniž by se tyto další konstrukce odchýlovaly od základní myšlenky vynálezu.

Podstatou vynálezu je společné použití - kombinace - systému se vstupem ve vzduchové mezeře a axiálního systému, které je umožněno tím, že chladicí kanály 14 probíhají podél potenciálních ploch odstředivého pole - na soustředných válcích - vytvářejícího se při otáčení rotoru.

Kolik vodičů 20 uložených v drážce 2 vinutí je napojeno na systém se vstupem ve vzduchové mezeře nebo axiální chladicí systém, závisí vždy na daných konkrétních poměrech. Předpokládá-li se rozdělení na dvě části, je zřejmé, že chlazení části se systémem se vstupem ve vzduchové mezeře je podstatně intenzivnější než u případu, kdy jsou všechny vodiče chlazeny podle systému se vstupem ve vzduchové mezeře, ježto množství chladicího plynu, které je k dispozici, zůstává v podstatě nezměno, kdežto množství ztrátového tepla, které se odvádí, se snižuje na polovinu. Důsledkem toho se oteplení chladicího plynu, jakož i rozdíl mezi specifickými vahami vstupujícího a vystupujícího chladicího plynu snižuje rovněž na polovinu. Snížením tohoto rozdílu a hloubky chlazené vrstvy na polovinu se snižuje i protitlak zabraňující proudění chladicího plynu.

Použije-li se axiálního systému chlazení pouze v dolní třetině nebo čtvrtině celkové výšky vinutí, působí i pak množství plynu proudícího z axiální části do společného výstupního kanálu příznivě, ježto snižuje zmíněný rozdíl ve specifických vahách. U provedení podle obr. 1 a 2 proudí mimo to do vstupního kanálu části chladicího systému se vstupem ve

vzduchové mezeře z axiálního chladicího systému méně horký chladicí plyn než v příkladě, kdy je celá drážka 2 vinutí chlazená systémem chlazení se vstupem ve vzduchové mezeře.

Kombinovaný chladicí systém podle vynálezu umožňuje - je-li chladicím plynem vinutí vodík - proudovou hustotu 15 až 20 A/mm² ve vinutích při přetlaku asi 5 At, takže při jeho použití je možno stavět turbogenerátory o jednotkovém výkonu vyšším než 1 000 MW.

PŘEDMĚT VYNÁLEZU

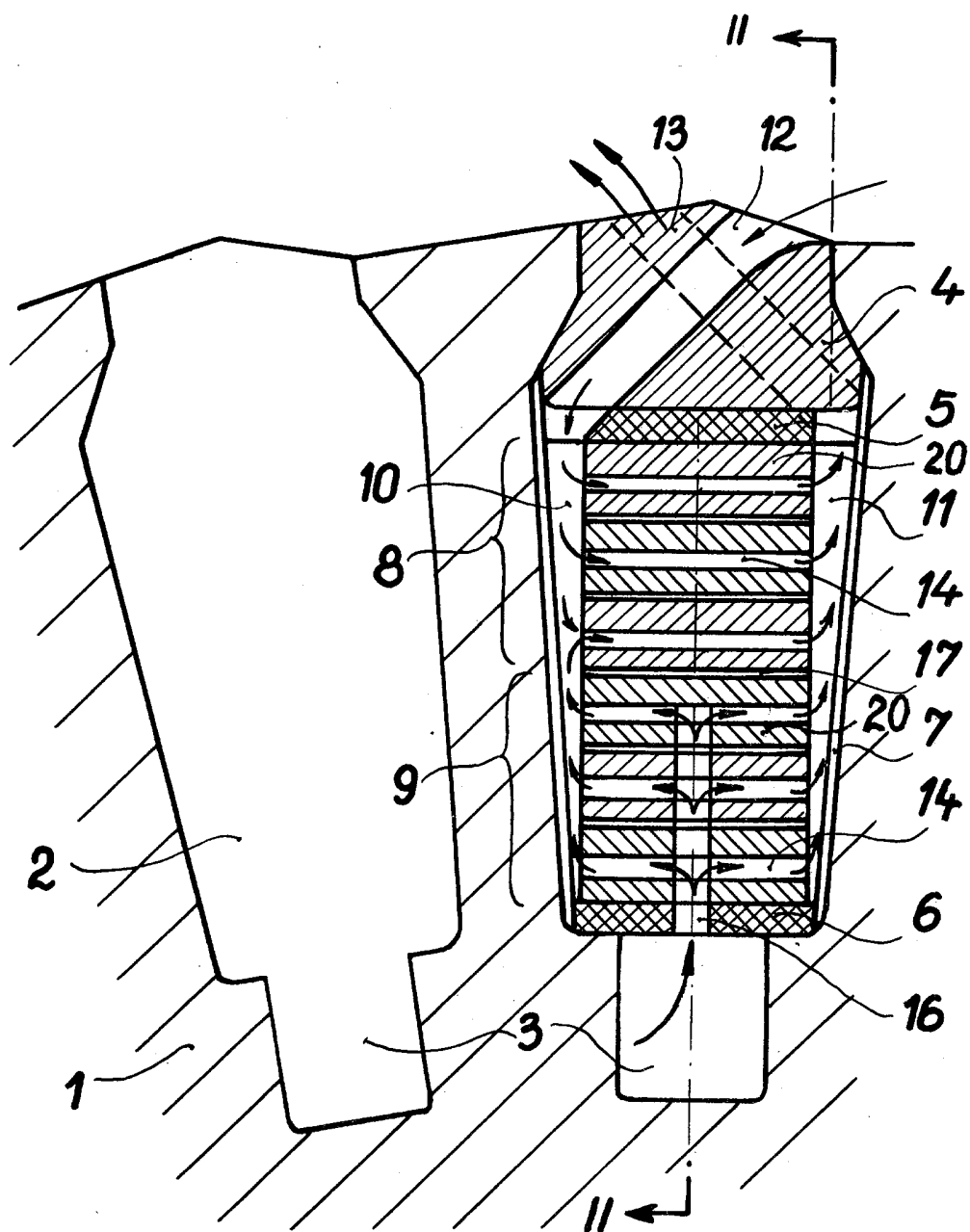
1. Plynem chlazený elektrický stroj točivý, zejména vysokotáčkový vysokovýkonový synchronní stroj, s přímo chlazeným vinutím motoru, jehož chladicí kanály leží na válcové ploše souosé s osou rotoru, přičemž každý vodič vinutí rotoru je ve spojení jednak s radiálně probíhajícími vtokovými kanály ústícími ve vzduchové mezeře vtokovými otvory našikmenými ve směru otáčení rotoru, jednak s radiálně probíhajícími výtakovými kanály ústícími ve vzduchové mezeře výtakovými otvory našikmenými proti směru otáčení rotoru a jehož vodiče, seskupené v každé drážce vinutí do radiálně vnější skupiny vodičů a do radiálně vnitřní skupiny vodičů, leží v oddělených proudcích chladicího plynu, přičemž první vtokové otvory jsou v axiálním směru rotoru uspořádány periodicky, vyznačující se tím, že na dně každé drážky (2) vinutí je vytvořena ventilační drážka (3) vyúsťující na obou čelních stranách rotoru, a která je ve spojení se všemi prvními vtokovými kanály (10) drážky (2) vinutí alespoň nepřímo přes část chladicích kanálů (14) radiálně vnitřní skupiny (9) vodičů (20) a chladicí kanály (14) drážky (2) vinutí jsou ve spojení se všemi výtakovými kanály (11) téže drážky (2) vinutí.

2. Plynem chlazený elektrický stroj točivý podle bodu 1, vyznačující se tím, že u elektrického stroje, u něhož chladicí kanály (14) jsou uspořádány tangenciálně, alespoň jeden chladicí kanál (14) radiálně vnitřní skupiny (9) vodičů (20) je spojen radiálně probíhajícími druhými vtokovými kanály (16), uspořádanými ve středové axiální rovině drážek (2) vinutí, s ventilační drážkou (3) a první vtokové kanály (10) a výtakové kanály (11) jsou uspořádány na protilehlých bočních stěnách drážky (2) vinutí.

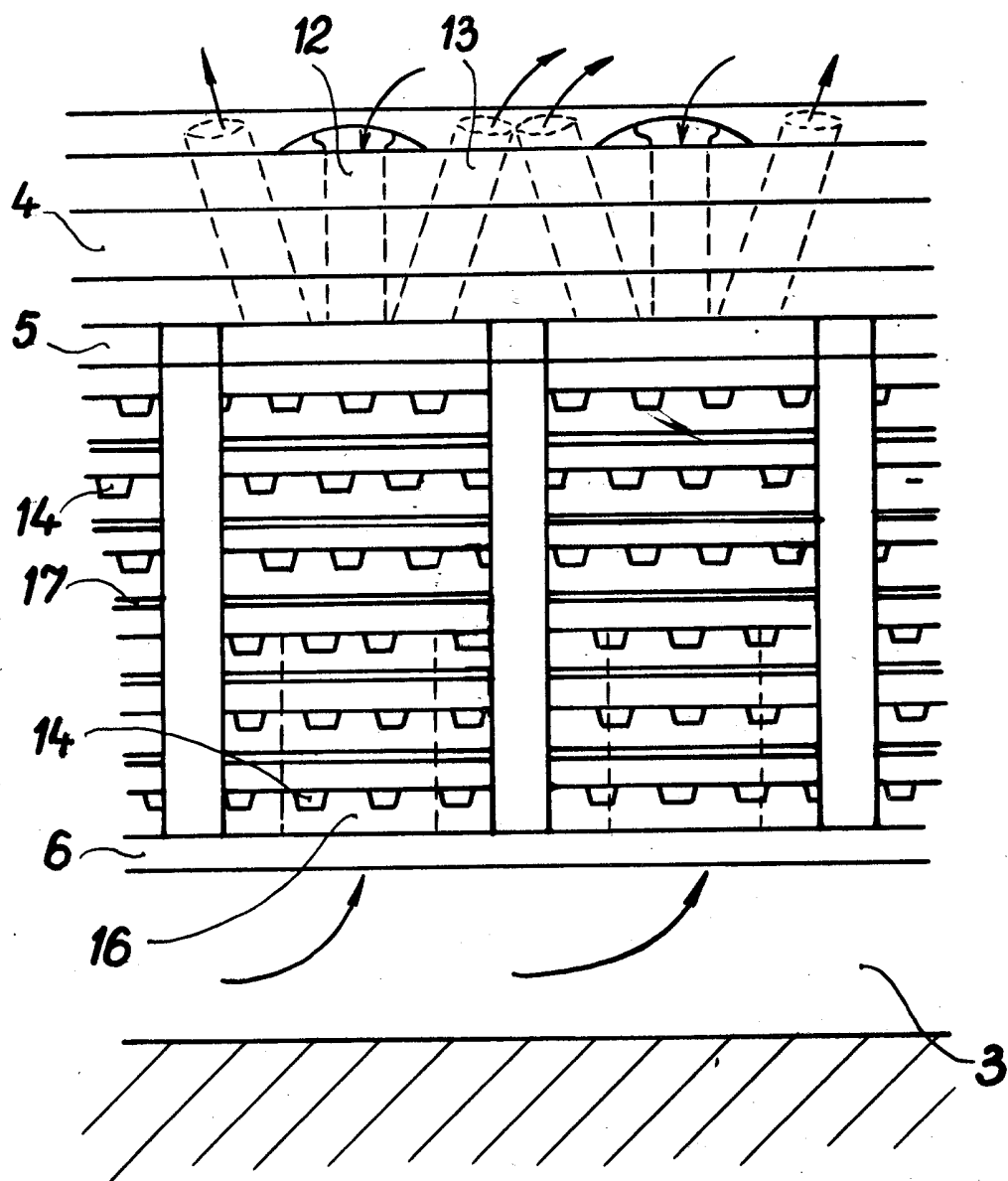
3. Plynem chlazený elektrický stroj točivý podle bodu 2, vyznačující se tím, že druhé vtokové kanály (16) sahají alespoň k chladicímu kanálu (14) ležícímu jako druhý nejbližší k ose rotoru.

4. Plynem chlazený elektrický stroj točivý podle bodu 1, vyznačující se tím, že u elektrického stroje, u něhož chladicí kanály (14) jsou uspořádány axiálně a první vtokové kanály (10), radiálně probíhající druhé vtokové kanály (16), spojující alespoň jeden chladicí kanál (14) radiálně vnitřní skupiny (9) vodičů (20) s ventilační drážkou (3), a výtakové kanály (11) jsou uspořádány v odstupu od sebe ve středové axiální rovině drážky (2) vinutí, jsou první vtokové kanály (10) a druhé vtokové kanály (16) spojeny s ventilační drážkou (3).

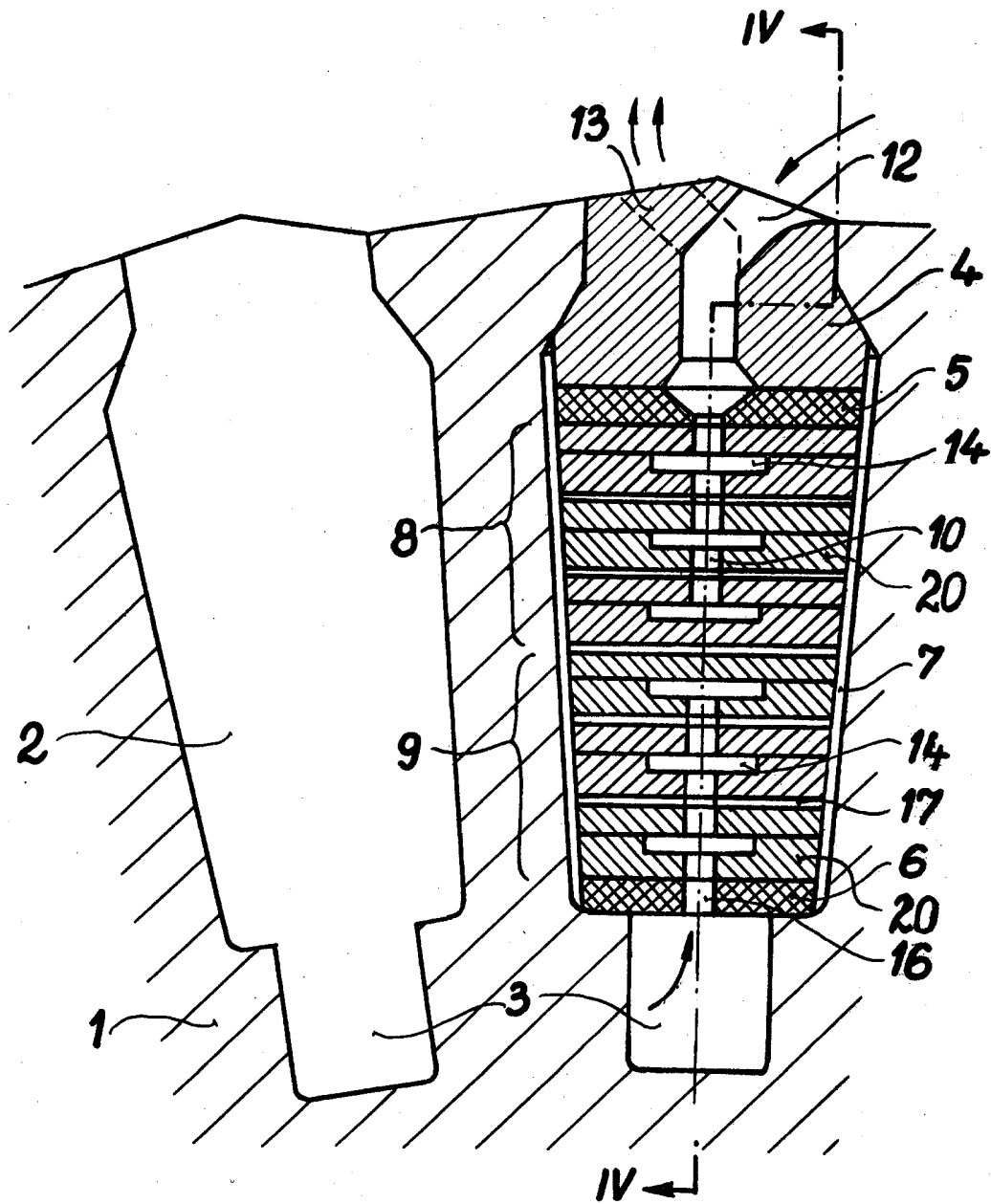
4 listy výkresů



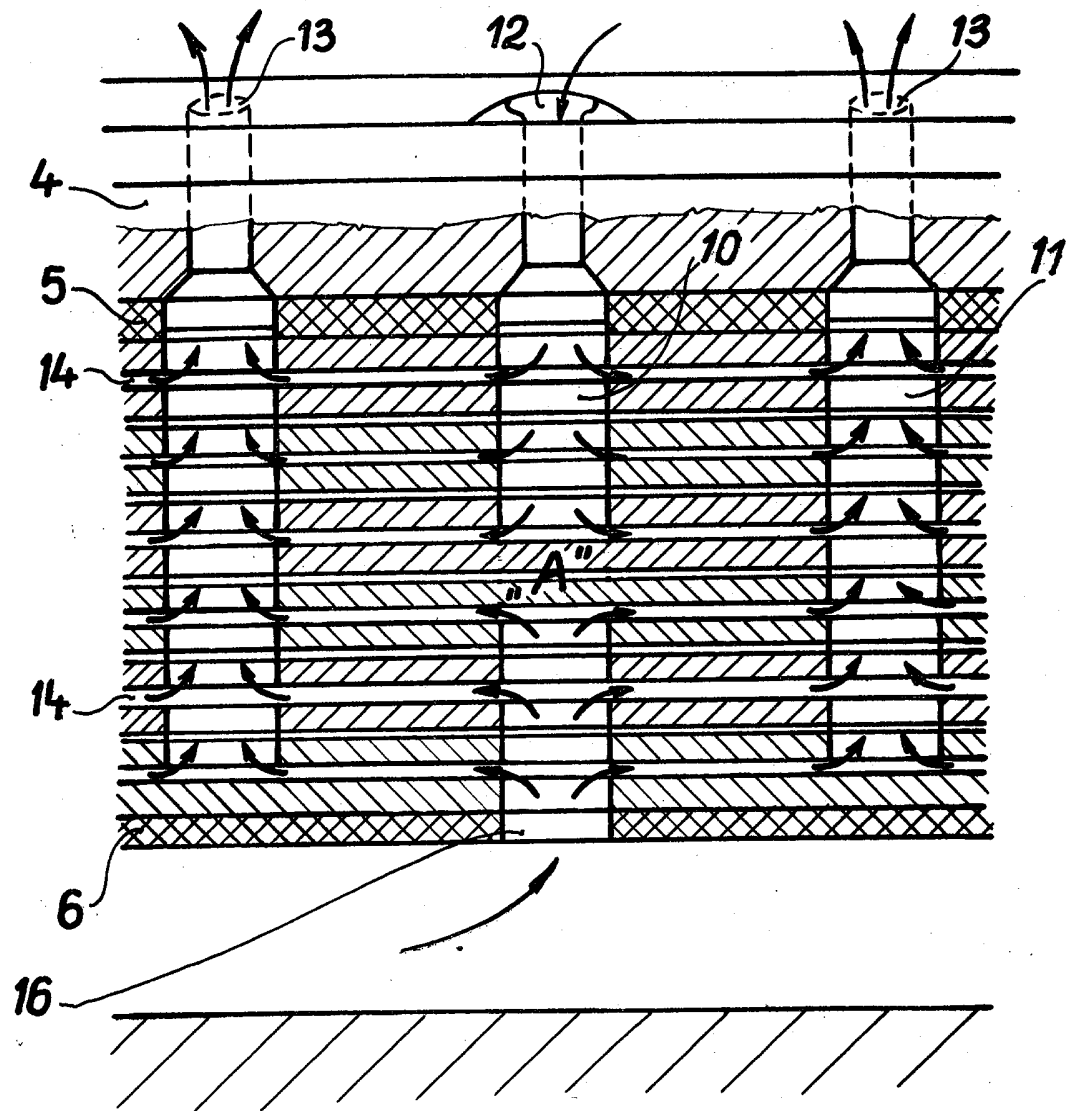
Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4