

# PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

Zveřejněná podle §31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

## 2022-482

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

*H02K 1/24* (2006.01)  
*H02K 1/26* (2006.01)  
*H02K 1/22* (2006.01)  
*H02K 1/28* (2006.01)  
*H02K 15/02* (2006.01)  
*H02K 19/06* (2006.01)

(19)  
ČESKÁ  
REPUBLIKA



ÚŘAD  
PRŮMYSLOVÉHO  
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **17.11.2022**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **03.01.2024**  
(Věstník č. 1/2024)

(71) Přihlašovatel:  
Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veverčí, CZ

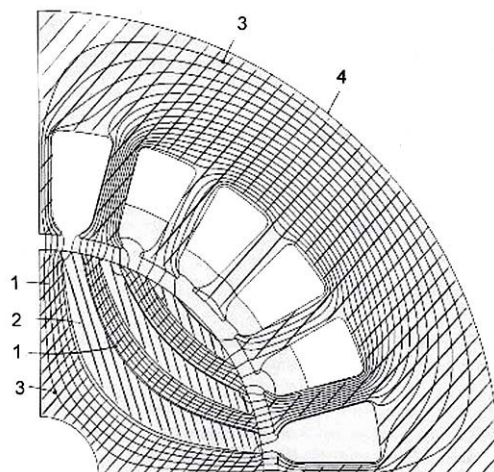
(72) Původce:  
doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D., Brno, Veverčí, CZ  
Ing. Petr Klíma, Žďár nad Sázavou, Žďár nad  
Sázavou 5, CZ  
Ing. Petr Procházka, Ph.D., Brno, Medlánky, CZ  
doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D., Brno, Medlánky,  
CZ  
Ing. Jan Bárta, Ph.D., Střelice, CZ

(74) Zástupce:  
Ing. Libor Markes, patentový zástupce, Grohova  
145/54, 602 00 Brno, Veverčí

(54) Název přihlášky vynálezu:  
**Způsob výroby rotoru synchronního  
reluktančního motoru a rotor synchronního  
reluktančního motoru**

(57) Anotace:  
Vynález se týká způsobu výroby rotoru synchronního reluktančního motoru tvořeného prohnutými vrstvami magneticky vodivého materiálu procházejícími celou délkou rotoru, které jsou proloženy bariérovými vrstvami materiálu s omezenou magnetickou vodivostí a rotorem zhotoveným uvedeným způsobem. Podstata způsobu spočívá v tom, že se vytvoří parametrický elektromagnetický model v programu využívajícím metodu konečných prvků, ve kterém se definují bariérové vrstvy vstupním parametrem jejich šířky v jejich radiální ose (o), následně se tímto modelem dopočtou souřadnice bodů obvodu bariéry v řezu, tak aby tvar bariéry kopíroval teoretický tvar siločár v rotoru, přičemž takto vytvořené bariéry jsou začleněny do topologie modelu rotoru, která se optimalizuje metodou MOO – optimalizací s více cíli – k dosažení nízkých ztrát, nízké hmotnosti a nízké teploty, načte se soubor dat popisujících optimalizovanou topologii modelu rotoru zavede do tiskárny SLM, nastaví se parametry tisku dle

použitých materiálů a rotor se nechá vytisknout jako kompaktní celek.



## Způsob výroby rotoru synchronního reluktančního motoru a rotor synchronního reluktančního motoru

### 5 Oblast techniky

Vynález se týká rotoru, zejména rotoru pro vysokootáčkové synchronní reluktanční motory (SRM), a způsobu jeho výroby.

10

### Dosavadní stav techniky

V současné době se u synchronních reluktančních motorů nejvíce používají rotory se vzduchovými bariérami  $\underline{B}$  – viz obr. 1. Jejich topologie využívá vzduch jako magneticky nevodivý materiál pro dosažení co nejvyššího poměru reluktancí v  $d$ - $q$  osách stroje, přičemž osa  $d$  je rovnoběžná s osou rotoru a osa  $q$  je kolmá k vrstvě feromagnetického materiálu. Díky tomu může takto řešený rotor produkovat velký moment s dobrou účinností. Mechanické spojení jednotlivých magneticky vodivých vrstev rotoru zajišťují můstky  $\underline{M}$  vyznačené na obr. 1. Ty ale snižují reluktanční poměr, čímž klesá maximální moment stroje a účinnost ve jmenovitém stavu. Zároveň jsou tyto můstky značně mechanicky namáhány odstředivou silou, takže se tato topologie používá pouze pro nízkootáčkové aplikace. Pro zlepšení mechanické odolnosti je možno bariéry překlenout dalšími můstky, ale opět za cenu snížení maximálního momentu a účinnosti. Pro potlačení negativního vlivu můstků na reluktanční poměr lze využít například proces nitridace těchto můstků, ale nízká mechanická pevnost rotoru zůstává. Rotory se vzduchovými bariérami popsaného typu jsou vytvořeny jako radiálně vrstvené. Vzduchové magnetické bariéry jsou vyřezány do kruhových rotorových plechů, které po složení v osovém směru a sevření vytvoří rotor. Ke zvýšení mechanické pevnosti rotoru mohou být vzduchové magnetické bariéry vyplněny epoxidovým materiálem. Tento typ rotoru je znám např. z WO 2008123636.

30

DE 102005004567 A1 uvádí způsob zhotovení rotoru elektrického stroje, který je tvořen jádrem sestávajícím z lamelových plechů, přičemž pól každého lamelového plechu radiálně vyčnívá z jádra a mezi póly jsou vytvořeny mosty mezi drážkami rotoru. Způsob spočívá v následujících krocích: zhotoví se lamelové plechy z oceli o vysoké relativní permeabilitě, která u nich klesá při radikálním ohřevu, jádro se tepelně zpracuje v oblasti můstků, takže vzniknou úseky s nízkou relativní permeabilitou.

35

Další známé topologie rotoru synchronního reluktančního motoru jsou na obr. 2 a 3. V těchto případech jsou bariéry  $\underline{B}$  vytvořeny z nemagnetických kovů nebo slitin, například z hliníku nebo mechanicky odolnějších slitin železa. Nevýhoda této topologie spočívá především v komplikovanosti výroby, kdy se nejčastěji používá sešroubování jednotlivých vrstev rotoru. US 2015/0015095 navrhuje propojení vrstev z magnetického a nemagnetického materiálu prostřednictvím rybinových drážek. Použití přichází v úvahu opět spíše u nízkootáčkových aplikací, především pokud je jako nemagnetický materiál použit hliník nebo jiný mechanicky neodolný materiál, anebo je spojení zajištěno šrouby. Při použití mechanicky odolnějších slitin železa a využití speciálních metod spojení jednotlivých vrstev, například izostatické svařování, explozivní svařování nebo vakuové pájení, bylo dosaženo vyšších obvodových rychlostí až kolem 125 m/s. Nicméně není znám motor pro vysokootáčkové aplikace (obvodová rychlost nad 150 m/s), jehož rotor by byl zhotoven tímto způsobem. Další nevýhodou řešení užívajících tuto technologii je, že pro čtyřpólové rotory je velmi obtížné vyrobit bariéry jiného tvaru, než jsou části mezikružní.

50

Vynález si klade za úkol navrhnout rotor pro synchronní reluktanční motory, který u vysokootáčkových aplikací umožní při vysokém reluktančním poměru dosáhnout obvodových rychlostí nad 150 m/s.

55

### Podstata vynálezu

5 Uvedený úkol splňuje způsob výroby rotoru synchronního reluktančního motoru tvořeného prohnutými vrstvami magneticky vodivého materiálu procházejícími celou délkou rotoru, které jsou proloženy bariérovými vrstvami materiálu s omezenou magnetickou vodivostí. Podstata způsobu spočívá v tom, že se vytvoří parametrický elektromagnetický model v programu využívajícím metodu konečných prvků, ve kterém se definují bariérové vrstvy vstupním  
10 parametrem jejich šířky v jejich radiální ose (o), následně se tímto modelem dopočtou souřadnice bodů obvodu bariéry v řezu, tak aby tvar bariéry kopíroval teoretický tvar siločár v rotoru, přičemž takto vytvořené bariéry jsou začleněny do topologie modelu rotoru, která se optimalizuje metodou MOO – optimalizací s více cíli – k dosažení nízkých ztrát, nízké hmotnosti a nízké teploty, načež se soubor dat popisujících optimalizovanou topologii modelu rotoru zavede do  
15 tiskárny SLM, nastaví se parametry tisku dle použitých materiálů a rotor se nechá vytisknout jako kompaktní celek.

Rotor synchronního reluktančního motoru zhotovený tímto způsobem má vrstvy magneticky vodivého materiálu tvarovány podle průběhu magnetických siločar v daném místě v modelu,  
20 přičemž zachovávají vzájemný odstup i na obvodu rotoru, přičemž materiálem magneticky vodivých vrstev je ocel s vysokou relativní magnetickou permeabilitou a materiálem bariérových vrstev ocel s nízkou relativní permeabilitou, přičemž poměr magnetických permeabilit materiálů obou vrstev je alespoň 50:1.

25 Rotor může být k prodloužení povrchové dráhy vířivých proudů a tím ke snížení ztrát jimi způsobených opatřen na povrchu radiálními drážkami. Tyto drážky na vnějším obvodu rotoru budou hluboké pouze jednotky milimetrů.

### Objasnění výkresů

Vynález bude dále objasněn pomocí výkresů, na nichž obr. 1 až 3 ilustrují známý stav techniky, přičemž obr. 1 představuje segment rotoru se vzduchovými bariérami, na obr. 2 je segment rotoru ve dvoupólové variantě, ve kterém jsou vrstvy magneticky vodivého materiálu a bariéry vrstveny  
35 axiálně a na obr. 3 segment radiálně vrstveného rotoru ve čtyřpólové variantě. Obr. 4 představuje topologii rotoru podle vynálezu v řezu a obr. 5 rovněž v řezu rozložení magnetické indukce v reluktančním motoru, který má rotor podle vynálezu.

### Příklady uskutečnění vynálezu

Rotor synchronního reluktančního motoru je tvořen magneticky vodivými vrstvami 1 zakřivenými podle průběhu magnetických siločar 3 modelu motoru v ustáleném stavu, jak je zřejmé z obr. 5, který ukazuje rotor umístěný v elektromagnetickém poli statoru 4. Magneticky  
45 vodivé vrstvy 1 se střídají s bariérovými vrstvami 2 magneticky nevodivého materiálu. Materiálem vodivých vrstev 1 je ocel 1.4542 s vysokou relativní magnetickou permeabilitou a materiálem bariér ocel 1.4404 s nízkou relativní permeabilitou, přičemž poměr magnetických permeabilit obou materiálů je větší než 50:1. Přitom vrstvy 1, 2 obou materiálů jsou vzájemně svařeny aditivní technologií SLM *Selective Laser Melting* a rotor je tudíž kompaktním  
50 svařencem.

Navržené řešení rotorů elektrických strojů využívá kombinaci materiálů s různými elektromagnetickými vlastnostmi a podobnými mechanickými vlastnostmi při jejich pevném spojení (splynutí). Jedná se o kombinaci materiálů v radiální rovině rotoru. Tím je možno získat  
55 rotory s dobrou kombinací mechanické odolnosti a elektromagnetických vlastností. Díky této

kombinaci vlastností jsou k dispozici topologie rotorů pro vysokootáčkové stroje, jež dříve nebylo možno vytvořit technologiemi, které byly k dispozici, popřípadě pouze velmi obtížně. K výrobě těchto rotorů je využito metody SLM. U ní lze z kovových prášků pomocí laserového tavení vytvořit složité tvary výrobků z více materiálů, které jsou pevně spojeny, podobně jako při svařování. Tato technologie umožní výrobu rotorů k novému využití synchronních reluktančních motorů pro vysokootáčkové aplikace. Výsledkem je topologie s výrazně lepšími mechanickými vlastnostmi, než mají stávající rotory vyráběné konvenčními metodami. Pokud se týká jejich elektromagnetických vlastností, mohou být dle použitých materiálů srovnatelné nebo lepší.

10 Využití rotorů z materiálů spojených SLM technologií je možné také v oblasti vysokootáčkových asynchronních strojů.

U navržené topologie a způsobu výroby rotoru SRM je rotor vyráběn po tenkých vrstvách metodou SLM. Při výrobě každé vrstvy se opakují procesy: nanesení prášku s materiálu na pozici podle materiálu žádoucího v daném místě, roztavení tohoto prášku laserem a opětovný přechod roztaveného materiálu do tuhého skupenství, čímž nastává pevné spojení celého průřezu rotoru a předchozí vrstvy. Rotor je tvořen segmenty z magneticky vodivé a nevodivé oceli, jak je zřejmé z jeho průřezu podle obr. 4. Segmenty jsou tvarovány tak, aby bylo dosaženo velkého reluktančního poměru, stejně jako u známé topologie se vzduchovými bariérami. Vrstvy magneticky vodivé oceli mají tvar magnetických siločar  $\mathfrak{z}$ , které by se vyskytovaly v magneticky homogenním válci modelu. Tímto způsobem je možno dosáhnout vysokého reluktančního poměru. Tyto složité tvary lze metodou SLM dobře vyrobit na rozdíl od způsobů výroby axiálně laminovaného rotoru popsaných výše. Zařízení na nanášení prášku s materiálu jednotlivých segmentů je přesně naváděno na souřadnice z modelu v ovládacím počítači, tvarové omezení jednotlivých segmentů se tedy u tohoto řešení nevyskytuje. Jelikož se všechny segmenty vyrábí jedním procesem (tavení prášku laserem), nastává mezi nimi pevná vazba.

Z magnetického hlediska se nemagnetické segmenty s nízkou relativní permeabilitou chovají podobně jako vzduch a zajišťují tak dobrý reluktanční poměr. Díky absenci jakýchkoliv můstků u tohoto řešení nedochází k poklesu reluktančního poměru, takže je zde možno dosáhnout vyšších reluktančních poměrů než u řešení se vzduchovými bariérami. Relativní permeabilita oceli pro nemagnetické segmenty by měla dosahovat maximálně jednotek. Ideální velikost je blízká jedné. U magnetických segmentů by měla relativní permeabilita dosahovat minimálně vysokých desítek, lépe stovek až tisíců.

35 Mechanické vlastnosti magnetických a nemagnetických ocelí (zejména hustota, modul pružnosti a koeficient teplotní roztažnosti) dosahují podobných hodnot a spojení segmentů je podobné svaření. Celý rotor se tedy chová z mechanického hlediska podobně jako homogenní ocelový válec, což je velká výhoda oproti rotoru se vzduchovými bariérami. Díky tomu lze využít navrženou topologii i pro vysokootáčkové aplikace, kde je mechanická odolnost jedním z nejdůležitějších parametrů. Při využití rotoru ve vysokootáčkových aplikacích, se projevuje výhoda nízkého sycení magneticky vodivých částí rotoru, což je pro vysokootáčkové stroje typické. Není tudíž nutné použít speciální elektrotechnické materiály s vysokou hodnotou saturační magnetické polarizace. Další výhodou je zmenšení celkových rozměrů stroje oproti nízkootáčkovým aplikacím, čímž nastává úspora materiálu.

U navrhovaného způsobu výroby rotoru se jako další výhoda jeví možnost zhotovit rotor s radiálními drážkami. Tyto drážky na vnějším obvodu rotoru jsou hluboké pouze jednotky milimetrů a slouží k prodloužení povrchové dráhy pro vířivé proudy. Tím dochází ke snížení jejich velikosti a ztrát jimi způsobených.

Vhodnost použití navrženého řešení rotoru ukazuje příklad vysokootáčkového motoru s výkonem 5 kW při 60 000 otáčkách. Vybrané parametry jsou na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Jako materiál pro magneticky vodivé části byla zvolena ocel 1.4542, pro magneticky nevodivé části ocel 1.4404. Vzhledem k elektromagnetické účinnosti 91,8 % lze prohlásit, že i přes použití

- 5 magneticky nevodivé oceli 1.4404 s relativní permeabilitou přibližně 1,8 (což snižuje reluktanční poměr oproti vzduchovým bariérám), dosahuje toto řešení dobré účinnosti. Maximální hodnota relativní permeability magneticky vodivé oceli 1.4542 činí přibližně 100. Výhodou těchto ocelí jsou především dobré mechanické vlastnosti a jejich dobrá dostupnost. Na obr. 5 je rozložení magnetické indukce v řešeném rotoru.

Tab. 1: Parametry motoru s rotorem podle vynálezu

Otáčky Rotoru	Moment		Výkon Výstupní	Ztráty				Účinnost Elektromagnetická
	Průměr	Zvlnění		Měď	Železo	Rotor	Celkové	
1/min	Nm	%	W	W	W	W	W	%
60 000	0,80	6,7	5 024	222,1	134,2	91,7	448,0	91,8

- 10 Bylo testováno mechanické napětí v rotoru s navrhovanou topologií a vyrobeného navrhovaným způsobem. Teplota všech segmentů rotoru byla nastavena na 150 °C a obvodová rychlost 200 m/s. Oba použité materiály (ocel 1.4542 a 1.4404) mají při výrobě metodou SLM mez kluzu vyšší než 500 MPa, tudíž maximální hodnotu napětí 209,6 MPa, která je s těmito výpočtovými podmínkami dostatečně nízká, a to s dobrou rezervou. Tím se prokazuje mechanická odolnost a vhodnost tohoto řešení rotoru.
- 15

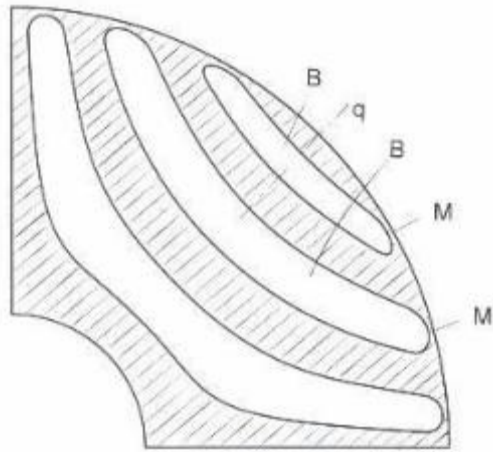
Rotor podle vynálezu byl zhotoven v následujících krocích:

- Tvorba parametrického elektromagnetického modelu v programu využívajícího metodu konečných prvků (MKP)
    - Tvorba tepelného modelu stroje pomocí odporové sítě
    - Zjištění maximálních rozměrů rotoru pomocí mechanických výpočtů MKP
    - Optimalizace pomocí genetického algoritmu NSGA-II
      - Vstupy optimalizace – elektromagnetický a tepelný model
      - Multi-objective optimization (MOO) – optimalizace s více cíli
      - Cíle optimalizace (např.)
        - nízké ztráty
        - nízká hmotnost
        - nízké teploty ve stroji
      - Na základě aplikace stroje vybrán kompromis mezi cíli optimalizace a z optimalizovaných řešení stroje vybrán výsledný stroj
    - Uložení rozměrů rotoru a detailů provedení jednotlivých bariér do souboru v PC
    - Soubor s rozměry rotoru nahrán do tiskárny SLM
      - nastavení parametrů tisku dle použitých materiálů je spuštěna výroba rotoru
  - Případné osoustružení rotoru na finální vnější průměr
  - Tepelné zpracování pro uvolnění mechanických napětí
  - Montáž rotoru do stroje
- 20
- 25
- 30
- 35

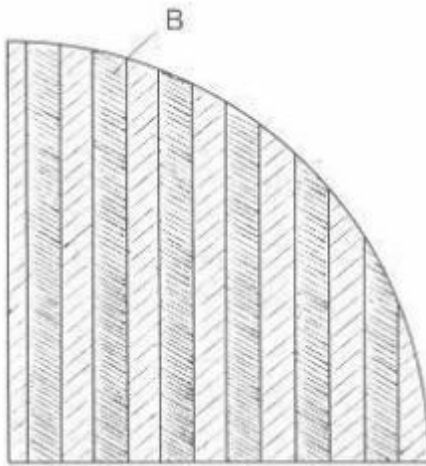
## PATENTOVÉ NÁROKY

- 5 1. Způsob výroby rotoru synchronního reluktančního motoru tvořeného prohnutými vrstvami magneticky vodivého materiálu procházejícími celou délkou rotoru, které jsou proloženy bariérovými vrstvami materiálu s omezenou magnetickou vodivostí, **vyznačující se tím**, že se vytvoří parametrický elektromagnetický model v programu využívajícím metodu konečných prvků, ve kterém se definují bariérové vrstvy vstupním parametrem jejich šířky v jejich radiální ose (o), následně se tímto modelem dopočtou souřadnice bodů obvodu bariéry v řezu, tak aby tvar bariéry kopíroval teoretický tvar siločár v rotoru, přičemž takto vytvořené bariéry jsou začleněny do topologie modelu rotoru, která se optimalizuje metodou MOO, optimalizací s více cíli, k dosažení nízkých ztrát, nízké hmotnosti a nízké teploty, načež se soubor dat popisujících optimalizovanou topologii modelu rotoru zavede do tiskárny SLM, nastaví se parametry tisku dle použitých materiálů a rotor se nechá vytisknout jako kompaktní celek.
- 10 2. Rotor synchronního reluktančního motoru zhotovený způsobem podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vrstvy (1) magneticky vodivého materiálu jsou tvarovány podle průběhu magnetických siločár (3) v daném místě v modelu, přičemž zachovávají vzájemný odstup i na obvodu rotoru, přičemž materiálem magneticky vodivých vrstev (1) je ocel s vysokou relativní magnetickou permeabilitou a materiálem bariérových vrstev (2) ocel s nízkou relativní permeabilitou, přičemž poměr magnetických permeabilit materiálů obou vrstev (1, 2) je alespoň 50:1.
- 15 3. Rotor synchronního reluktančního motoru podle nároku 2, **vyznačující se tím**, že je na povrchu opatřen radiálními drážkami.
- 20

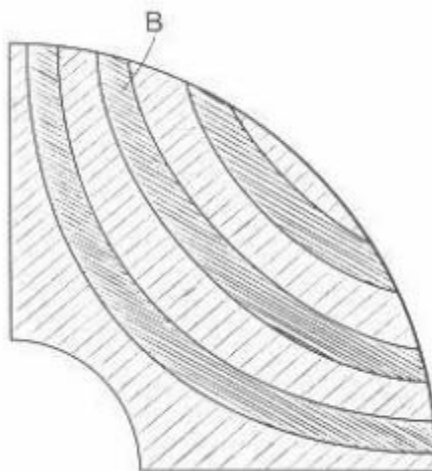
2 výkresy



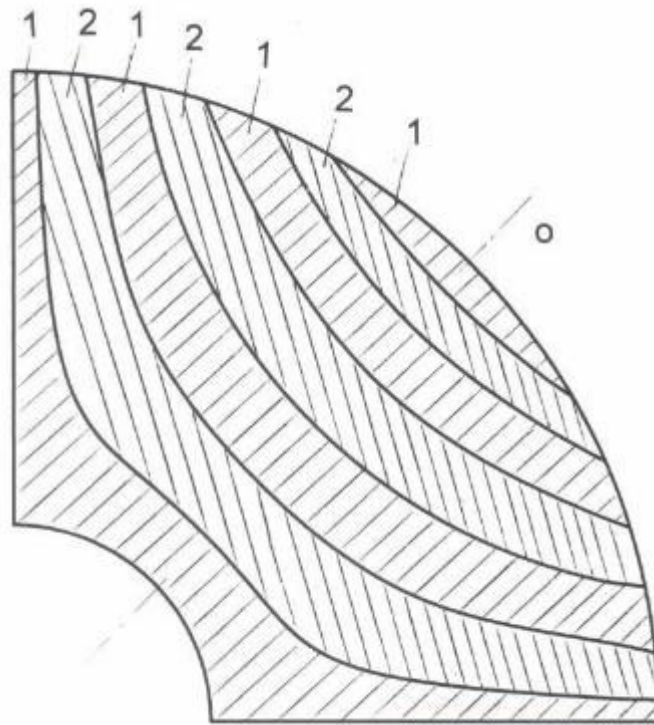
Obr. 1



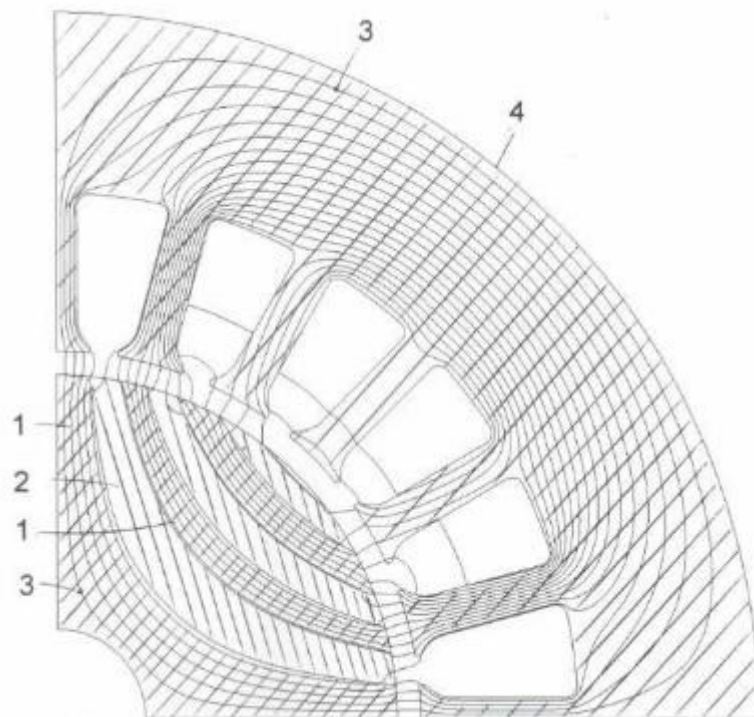
Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4



Obr. 5