

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL** (11) **237512**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **428430**

(22) Data zgłoszenia: **31.12.2018**

(51) Int.Cl.

H02K 21/46 (2006.01)

H02K 21/14 (2006.01)

H02K 1/27 (2006.01)

H02K 1/16 (2006.01)

(54) **Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi
o rozruchu bezpośrednim klasy sprawności IE5**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
13.07.2020 BUP 15/20

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
19.04.2021 WUP 08/21

(73) Uprawniony z patentu:

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE,
Kraków, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

WIESŁAW JAŻDŻYŃSKI, Kraków, PL

PL 237512 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest konstrukcja obwodu elektromagnetycznego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim. (LSPMSM – line start permanent magnet synchronous motor) i danych wejściowych $U_N=400$ V, $P_N=0,75$ kW, $f_N=50$ Hz, $2p=4$. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim jest konstrukcją, która łączy w sobie zalety dwóch rodzajów silników synchronicznego i indukcyjnego. W stanie ustalonym silnik pracuje jak maszyna synchroniczna, rotor obraca się z prędkością synchroniczną, w klatce nie indukuje się prąd, nie ma strat w wirniku. Przy rozruchu natomiast uwidacznia się wpływ prętów klatki, silnik pracuje wówczas jak indukcyjny, wpływ stałych magnesów jest niewielki. Obszar materiałów magnetycznych przeznaczonych na magnesy trwałe notuje ciągły rozwój i uzyskiwane są coraz lepsze materiały o lepszych właściwościach, niż stosowane obecnie.

Maszynę synchroniczną z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) można traktować, jako zmodyfikowany silnik indukcyjny klatkowy z magnesami trwałymi w wirniku i dlatego w literaturze fachowej konstrukcję tą nazywa się czasem maszyną asynchroniczną synchronizowaną. W stanie pracy ustalonej LSPMSM ma cechy silnika synchronicznego. Klatka w wirniku pełni rolę obwodów tłumiących oraz umożliwia dokonanie rozruchu asynchronicznego, podobnie jak w klasycznym silniku synchronicznym. Silniki typu LSPMSM są konstrukcjami znanymi i stosowanymi w praktyce od szeregu lat. Jednak w ostatnich latach nastąpił wzrost zainteresowania konstrukcjami tego typu. Jest to spowodowane rozwojem materiałów magnetycznych trwałych i spadkiem ich ceny oraz coraz doskonalszymi technikami projektowania silników, co skutkuje poprawą własności maszyn LSPMSM, wyrażającą się zmniejszeniem wymiarów i zwiększeniem sprawności znamionowej przy tej samej mocy wyjściowej. W ostatnich latach tworzone są konstrukcje LSPMSM o coraz większych mocach.

W praktyce funkcjonują różne typy silników synchronicznych z magnesami trwałymi (Permanent Magnet Synchronous Motor, w skrócie PMSM), w zależności od sposobu ułożenia magnesów w wirniku, przy czym silniki przeznaczone do rozruchu bezpośredniego (LSPMSM) wykonuje się z magnesami znajdującymi się we wnętrzu wirnika (Interior Permanent Magnet – IPM, typ "Burried").

Podstawowe różnice konstrukcji silników IPM z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim oraz ich wielkość, wynikają głównie z ich danych wyjściowych (U_N , P_N , f_N , $2p$). Natomiast o efektywności konstrukcji silników IPM z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim decydują głównie takie elementy konstrukcyjne jak układ i sposób rozmieszczenia magnesów w wirniku, które włożone są w odpowiednie wycięcia w blachach wirnika oraz kształt klatki. W zależności od litery, którą przypomina dana topologia magnesów, w obrębie jednej podziałki biegunowej, znane są układy z magnesami typu I, O, C, U, V lub W. Konstrukcja z magnesami typu „U” posiada lepsze właściwości eksploatacyjne niż konfiguracje innych typów.

Prace konstrukcyjne nad nowymi rozwiązaniami silników IPM z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim i konfiguracji magnesów typu U, koncentrują się nad takim układem magnesów oraz doбором parametrów silnika, aby zapewnić maksymalną sprawność znamionową, a równocześnie maksymalny moment elektromagnetyczny oraz zdolność do samorozruchu, przy minimalizacji wymiarów silnika oraz uproszczeniu rozwiązań technologicznych.

Podstawowym kierunkiem prac konstrukcyjnych jest opracowanie właściwych wymiarów poszczególnych elementów wirnika i stojana tak, aby uzyskać optymalny rozkład pola elektromagnetycznego i możliwie najmniejsze wymiary konstrukcji (koszt silnika) przy założonych danych wejściowych silnika takich jak U_N , P_N i f_N , $2p$ oraz utrzymanie silnika w założonej klasie sprawności. Inne podejście polega np. na wyznaczeniu wymiarów konstrukcji tak, aby była maksymalna sprawność, przy spełnieniu narzuconych wymagań projektowych, fizykalnych, geometrycznych, technologicznych, ekonomicznych i innych.

Przykładem drugiego z wymienionych wyżej podejść jest chiński patent o numerze CN 103647414, którego przedmiotem jest inny typ silnika a mianowicie trójfazowy silnik asynchroniczny o mocy 5500 W. Patent polega na odpowiednim ukształtowaniu elementów blach stojana i wirnika oraz określeniu takich ich wymiarów, które w efekcie pozwoliły na zmniejszenie całkowitej ilości strat energii o 33,1% oraz na wzrost wydajności konwersji energii o ponad 2,5% co pozwoliło jak to określa patent na zbudowanie trójfazowego silnika asynchronicznego o mocy 5500 W jako silnika o ultra wysokiej wydajności i oszczędności energii.

W stanie techniki w literaturze patentowej znane są rozwiązania konstrukcyjne silnika LSPMSM typu IPM o konfiguracji magnesów typu „U”.

Znany jest z tajwańskiego wzoru użytkowego o numerze TWM 323161 układ magnesów trwałych w konfiguracji U składający się z 12 magnesów płaskich łączonych po trzy w ten sposób, że cztery magnesy tworzą obrys kwadratu wokół wału, na którym umieszczony jest wirnik. Boki kwadratu nie stykają się, natomiast z każdym z końców wszystkich czterech magnesów, stanowiących otoczenie wału, połączone są magnesy skierowane promieniowo w stronę prętów klatki, która umieszczona jest w żłobkach półzamkniętych na obwodzie wirnika. Magnesy tworzą 4 sekcje, z których każda składa się z jednego magnesu stycznego oraz dwóch magnesów promieniowych połączonych z magnesem stycznym pod kątem rozwartym. Pomiedzy każdą sekcją jest prześwit pomiędzy dwoma równoległymi magnesami promieniowymi a przez prześwity przeprowadzone są dwie prostopadłe średnice wirnika. Rozwiązanie polegające na umieszczeniu magnesów w opisany sposób powoduje, że nie można w tej konfiguracji wykorzystać całej podziałki biegunowej τ_p , gdzie $\tau_p = d_s/(2p)$, w celu uzyskania maksymalnego strumienia magnetycznego a z tego powodu proponowana w przedmiotowym rozwiązaniu konfiguracja magnesów nie zapewnia osiągnięcia maksymalnego efektu wykorzystania potencjalnych możliwości silnika IPM z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim i konfiguracji magnesów typu U.

Z chińskiego wzoru użytkowego, o numerze CN 203896071, znany jest układ magnesów trwałych typu U w generatorze synchronicznym. W wirniku generatora nie ma klatki (nie jest to, więc konstrukcja LSPMSM), co ma wpływ na układ magnesów trwałych. W przedmiotowym wzorze, każdy magnes promieniowy posiada dwa mostki oddzielające je od magnesów stycznych, przy czym jeden z dwóch mostków posiada przerwę, która ma służyć ograniczeniu strumienia rozproszenia. Oznacza to, że cały moment elektromagnetyczny między wałem i elementami wirnika jest przenoszony przez drugi, nieprzerwany mostek. Względny wytrzymałościowy wymuszają zwiększenie przekroju tego mostka, co w efekcie zwiększa strumień rozproszenia, a także powoduje pogorszenie względów wytrzymałościowych.

Problemem wynalazczym jest opracowanie nowej konstrukcji silnika LSPMSM typu IPM o nowej konfiguracji magnesów typu „U” i o nowym usytuowaniu wzajemnym elementów wirnika i stojana oraz o właściwych ich wymiarach, w celu uzyskaniu maksymalnej sprawności i efektywności rozwiązania oraz zmniejszenia jego wymiarów i kosztów wytwarzania.

Celem rozwiązania jest konstrukcja silnika LSPMSM o konfiguracji magnesów typu „U”, o nowej geometrii blach wirnika i nowego układu magnesów oraz typu klatki rozruchowej, mającej na celu minimalizacji strumienia rozproszenia magnesów trwałych i uzyskaniu maksymalnej sprawności, przy zachowaniu narzuconych wymogów wytrzymałościowych, przeciążalności oraz zdolności do samorozruchu przy obciążeniu silnika.

Cel ten został zrealizowany w przedmiotowym wynalazku, w którym obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim, posiadający rdzeń stojana złożony z jednakowo wykrojonych blach prądnicowych o kształcie pierścienia z wycięciami technologicznymi, z równomiernie rozłożonymi na obwodzie rdzenia półzamkniętymi żłobkami, w których jest umieszczone uzwojenie stojana, oraz rdzeń wirnika złożony z jednakowo wykrojonych blach prądnicowych, z zamkniętymi otworami okrągłych żłobków, w których umieszczona jest klatka wirnika i z wykrojonymi otworami, w których zamocowane są magnesy trwałe o konfiguracji U, jest zbudowany w ten sposób, że w blachach prądnicowych rdzenia wirnika, znajdują się cztery wycięcia styczne, stanowiące gniazda stycznych magnesów trwałych oraz cztery wycięcia promieniowe, stanowiące gniazda promieniowych magnesów trwałych. Najmniejsza odległość (h_{m1}) krawędzi wycięć stycznych od wału, na którym zamocowany jest wirnik, jest większa niż 1,65 mm i mniejsza niż 1,75 mm a korzystnie wynosi 1,7 mm. Układ U dla 4-ch biegunów silnika tworzą 4 jednakowe magnesy trwałe umieszczone w czterech wycięciach stycznych wirnika i spolaryzowane prostopadle do osi wzdłużnej wycięcia, oraz 4 jednakowe magnesy trwałe umieszczone w wycięciach promieniowych i spolaryzowane w kierunku prostopadłym do ich osi wzdłużnej. W blachach prądnicowych znajduje się 20 jednakowych i równomiernie rozłożonych na obwodzie blachy prądnicowej wirnika zamkniętych okrągłych żłobków, w których po złożeniu blach i uformowaniu rdzenia umieszczone jest, odlane z aluminium uzwojenie klatkowe wirnika. Mostek, stanowiący odległość pomiędzy krawędzią otworu okrągłego żłobka zamkniętego a krawędzią blachy wirnika oraz mostek stanowiący odległość pomiędzy krawędzią otworu żłobka zamkniętego a krawędzią otworu dla magnesów promieniowych są identyczne (h_{r1}) = (h_{r2}) i są większe niż 0,40 mm oraz mniejsza niż 0,45 mm a korzystnie wynoszą 0,40 mm. Natomiast mostki stanowiące odległość pomiędzy otworami dla magnesów stycznych i promieniowych mają szerokość (h_{m2}), która mieści się w przedziale [0,50–0,55] mm i korzystnie wynosi 0,5 mm. Otwory dla magnesów promieniowych mają zarys strzałek i zakończone są grotem, w kształcie prostokątnego trójkąta równoramiennego skierowanego wierzchołkiem, zawierającym kąt prosty, w stronę środka okręgu opisanego na blasze prądnicowej

wirnika. Szerokość otworów w części stanowiącej ramiona magnesów promieniowych jest równa szerokości otworów dla stycznych magnesów trwałych a grubość magnesów jest o 0,2 mm mniejsza od szerokości otworów, ze względu na potrzebę uzyskania luzu montażowego.

Wycięcia stycznne, stanowiące gniazda stycznych magnesów trwałych, mają długość (l_{m1}) w przedziale [28,3–28,5] mm a korzystnie 28,4 mm oraz szerokości (b_{m1}) w przedziale [2,15–2,25] mm a korzystnie 2,2. Wycięcia promieniowe, stanowiące gniazda promieniowych magnesów trwałych, mają długości (l_{m2}) w przedziale [5,6–5,8] mm a korzystnie 5,8 mm, oraz szerokości w części ramion (b_{m2}) równą szerokości otworów dla stycznych magnesów trwałych. W wycięciach stycznych i promieniowych blach montuje się magnesy trwałe wykonane z materiału magnetycznego Nd-Fe-B. Na obwodzie wirnika w 20-tu zamkniętych żłobkach wirnika są umieszczone okrągłe pręty uzwojenia klatkowego odlanego z aluminium o średnicy pręta (b_{r2}) w przedziale [6,2–6,3] mm a korzystnie 6,2 mm. Po obu stronach rdzenia wirnika pręty klatki są zwarte jednakowymi pierścieniami zwierającymi. Wysokość przekroju pierścienia mieści się w przedziale [8,1–8,3] mm i wynosi korzystnie 8,2 mm zaś szerokości przekroju mieści się w przedziale [7,9–8,1] mm i wynosi korzystnie 8,0 mm, przy warunku, że średnica zewnętrzna (d_r) wirnika jest równa średnicy zewnętrznej pierścienia klatki (d_{pr}). Blachy ograniczające rdzeń wirnika, znajdujące się na początku i na końcu stosu blach prądnicowych, z których składa się wirnik, posiadają wykrój analogiczny jak pozostałe blachy wirnika, przy czym długość (l_{m3}) wcięć promieniowych jest mniejsza niż w pozostałych blachach i ma wymiar, który mieści się w przedziale [2,7–2,9] mm a korzystnie wynosi 2,8 mm. Rdzeń wirnika ma długość [80,0–100,0] mm i jest złożony z jednakowo wyciętych blach prądnicowych o średnicy zewnętrznej (d_r) w przedziale [69,9–70,1] mm a korzystnie 70,0 mm, oraz o średnicy wewnętrznej (d_{ri}) w przedziale wartości [26,0–26,1] mm a korzystnie wynosi 26,0 mm, co odpowiada średnicy wału silnika, na którym zamocowany jest wirnik.

Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według wynalazku posiada rdzeń stojana, o długości [80,0–100,0] mm, złożony z jednakowo wykrojonych blach prądnicowych o średnicy zewnętrznej (d_{se}) w przedziale [119,8–120,0] mm a korzystnie 120 mm oraz o średnicy wewnętrznej (d_s) w przedziale [70,4–70,6] mm a korzystnie 70,5 mm. W blachach rdzenia stojana znajdują się 24 jednakowe i równomiernie rozłożone na obwodzie blachy rdzenia półzamknięte żłobki, w których, po uformowaniu rdzenia umieszczone jest uzwojenie stojana. Wymiary półzamkniętego żłobka stojana wynoszą

- szerokość zęba stojana (b_{ds}) – w przedziale [3,75–3,85] mm, korzystnie 3,8 mm,
- szerokość podstawy żłobka (b_{3s}) – w przedziale [9,15–9,25] mm, korzystnie 9,2 mm,
- szerokość przyszczelinowej części żłobka (b_{2s}) – w przedziale [5,6–5,8] mm, korzystnie 5,7 mm,
- szerokość otwarcia żłobka (b_{1s}) – w przedziale [2,3–2,4] mm, korzystnie 2,3 mm,
- wysokości strefy domknięcia żłobka (h_{1s}) – w przedziale [0,45–0,55] mm, korzystnie 0,5 mm, oraz (h_{2s}) – w przedziale [0,35–0,45] mm, korzystnie 0,4 mm,
- wysokość aktywnej części żłobka (h_{23s}) – w przedziale [13,75–13,85] mm, korzystnie 13,8 mm,
- promień zaokrągleń technologicznych ($R1.0$) – w przedziale [0,9–1,1] mm, korzystnie 1,0 mm,
- promień zaokrągleń technologicznych ($R0.2$) – w przedziale [0,15–0,25] mm, korzystnie 0,2 mm,
- promień zaokrągleń technologicznych ($R0.5$) – w przedziale [0,45–0,55] mm, korzystnie 0,5 mm.

Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według wynalazku charakteryzuje się również tym że podwójna szerokość szczeliny powietrznej pomiędzy wirnikiem a stojanem równa ($d_s - d_r$) ma wymiar w przedziale [0,45–0,55] mm a korzystnie wynosi on 0,5 mm.

Silnik o obwodzie elektromagnetycznym według wynalazku, posiadającym konstrukcję i wymiary przedstawione powyżej w istocie wynalazku, pozwala uzyskać sprawność znamionową ponad 88,5%, co kwalifikuje go do projektowanej klasy sprawności IE 5 w normie IEC 60034-30-1. Ograniczenie strumienia rozproszenia zmniejsza objętość i koszt potrzebnych magnesów. Przeciężalność powyżej 2,0, przy napięciu znamionowym, pozwala na pracę z obciążeniem znamionowym również przy obniżonym napięciu, przy którym silnik ma sprawność ok. 89% i współczynnik mocy ponad 93%. W silniku według wynalazku uzyskano wyraźne zmniejszenie strat w stosunku np. do silników indukcyjnych o tych samych danych wejściowych silnika U_N , P_N , f_N , $2p$ o najwyższej klasie sprawności IE 3 dostępnej na rynku,

wynoszące ok. 6% mocy znamionowej, czyli ok. 45 W. W efekcie, ze względu na możliwość powszechnego zastosowania silnika według wynalazku, należy oczekiwać istotnego zmniejszenia zapotrzebowania na energię elektryczną, przez urządzenia wykorzystujące napęd elektryczny, co w efekcie przyczyni się do ograniczenia zanieczyszczenia środowiska i redukcji emisji CO₂. Silniki LSPMSM są droższe od indukcyjnych ze względu na obecność magnesów trwałych, jednak czas zwrotu dodatkowych nakładów jest znacznie krótszy od okresu użytkowania silnika, co zapewnia użytkownikowi wymierne korzyści ekonomiczne. Dodatkową korzyścią jest osiągnięcie celu wynalazku przy ciężarze silnika o ponad 10% mniejszym od silnika indukcyjnego klasy sprawności IE 3 o tym samym wzniosie wału oraz tych samych danych wejściowych U_N , P_N , f_N , $2p$. Okrągłe żłobki wirnika silnika wg wynalazku minimalizują indukcyjność rozproszenia przy tej samej rezystancji uzwojenia wirnika, a to zwiększyło pewność osiągnięcia stanu synchronizmu w czasie rozruchu.

Przedmiot wynalazku jest przedstawiony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia schematyczny widok przekroju obwodu elektromagnetycznego silnika LSPMSM, Fig. 2 – widok wykroju blachy stojana, Fig. 3 – widok strefy zębowej stojana, Fig. 4 – widok wykroju blachy wirnika, Fig. 5 – widok strefy zębowej wirnika oraz węzła magnesów trwałych, oraz Fig. 6 – widok wykroju blach wirnika ograniczających rdzeń wirnika.

Wykonany, w przykładzie realizacji, obwód elektromagnetyczny silnika LSPMSM jest przeznaczony dla silnika o danych: $U_N=400$ V, $P_N=0,75$ kW, $f_N=50$ Hz, $2p=4$. Składa się on z rdzenia wirnika (3) o długości 80,0 mm, który jest złożony ze 158 jednakowo wyciętych blach prądnicowych M 470 – 50 A o grubości 0,5 mm o średnicy zewnętrznej (d_r) równej 70,0 mm, oraz o średnicy wewnętrznej (d_{ri}) równej 26,0 mm, odpowiadającej średnicy wału (7) silnika. Wokół wału (7) znajdują się 4 wycięcia stycznne (5) na magnesy trwałe o długości (l_{m1}) równej 28,4 mm, oraz szerokości (b_{m1}) równej 2,2 mm. Odległość (h_{m1}) wycięć stycznnych (5) od wału (7) wynosi 1,7 mm. Wycięcia stycznne (5) tworzą figurę o obrysie kwadratu wokół wału (7). Na 2 liniach przechodzących przez leżące naprzeciw naroża kwadratu i krzyżujących się pod kątem prostym w środku wirnika umieszczone są 4 wycięcia promieniowe (6) na magnesy trwałe o długości (l_{m2}) wynoszącej 5,8 mm, oraz szerokości (b_{m2}) równej 2,2 mm, wypełniając odległość od naroża figury tworzonej przez magnesy stycznne (5) a jednym z jednakowych zamkniętych okrągłych żłobków (4), których 20 rozłożonych jest równomiernie na obwodzie rdzenia (3).

W 20 zamkniętych okrągłych żłobkach (4), po złożeniu blach i uformowaniu rdzenia, jest odlane z aluminium uzwojenie klatkowe wirnika, o średnicy pręta b_2 równej średnicy żłobka o wartości 6,2 mm. Rozmieszczenia elementów obwodu elektromagnetycznego wirnika spełnia nadrzędny warunek wzajemnej odległości, określanej wymiarami mostków; dla mostka stanowiącego minimalną odległość krawędzi żłobka (4) od krawędzi blachy wirnika, którego szerokość jest oznaczona (h_{r1}), wynosi 0,4 mm, dla mostka stanowiącego minimalną odległość krawędzi żłobka (4) od krawędzi magnesu promieniowego (6), którego szerokość jest oznaczona (h_{r2}) – wynosi 0,4 mm, i jest równa (h_{r1}) a dla mostków, stanowiących odległość krawędzi grota magnesu promieniowego (6), których szerokość jest oznaczonych (h_{m2}) – wynosi 0,5 mm. Podwójna szerokość szczeliny powietrznej równa różnicy (d_s-d_r) średnicy wirnika (3) oraz wewnętrznej średnicy stojana (1) wynosi 0,5 mm.

Rdzeń wirnika (3) posiada dodatkowo pierwszą i ostatnią blachę, o wycięciach identycznych jak w pozostałych blachach rdzenia, za wyjątkiem długości wycięć promieniowych, które są w blachach zamykających rdzeń wirnika (3) krótsze niż w pozostałych blachach i wynoszą 2,8 mm.

Drugim elementem obwodu magnetycznego silnika LSPMSM, przeznaczonym dla silnika o danych: $U_N=400$ V, $P_N=0,75$ kW, $f_N=50$ Hz, $2p=4$, jest rdzeń stojana (1) o takiej samej długości jak rdzeń wirnika 80,0 mm, który jest złożony ze 160 jednakowo wyciętych blach prądnicowych M 470–50 A o grubości 0,5 mm, o średnicy zewnętrznej (d_{se}) równej 120 mm, z wycięciami technologicznymi o głębokości 1,5 mm: (9) i (10) – do trwałego umocowania rdzenia w, nieujawnionej na rysunku, obudowie oraz (8) – pozycjonującego rdzeń względem obudowy.

Stojan (1) ma średnicę wewnętrzną (d_s) równą 70,5 mm i posiada 24 jednakowe i równomiernie rozłożone na obwodzie wewnętrznym rdzenia (1) półzamknięte żłobki (2), w których po złożeniu blach i uformowaniu rdzenia jest umieszczone uzwojenie stojana. Poszczególne elementy żłobka stojana mają wymiary:

- szerokość zęba stojana (b_{ds}) wynosi 3,8 mm,
- szerokość podstawy żłobka (b_{3s}) wynosi 9,2 mm,
- szerokość przyszczelinowej części żłobka (b_{2s}) wynosi 7 mm,
- szerokość otwarcia żłobka (b_{1s}) wynosi 2,3 mm,
- wysokości strefy domknięcia żłobka (h_{1s}) wynosi 0,5 mm, oraz (h_{1s}) wynosi 0,4 mm,

- wysokość aktywnej części żłobka (h_{23s}) wynosi 13,8 mm,
- promień zaokrągleń technologicznych ($R1.0$) wynosi 1,0 mm, ($R0.2$) – wynosi 0,2 mm, oraz ($R0.5$) wynosi 0,5 mm.

W półzamkniętych żłobkach stojanych (2) jest umieszczone 3-fazowe uzwojenie (jednowarstwowe, wzornikowe i średnicowe) o danych: $Z = 24$, $2p = 4$, $y = 6$, $q = 2$, i własnościach:

- napięcie znamionowe – $U_N = 400$ [V] dla uzwojeń fazowych stojana połączonych w gwiazdę
- częstotliwość – $f_N = 50$ [Hz]
- liczba biegów silnika – 1
- liczba żłobków stojana – $Q_s = 24$
- liczba biegunów – $2p = 4$
- przewód nawojowy emaliowany miedziany DNE 155
- średnica znamionowa żyły przewodu gołego – $d_{el} = [0,500-0,600]$ [mm]
- ilość zwojów szeregowych na fazę – $z_s = [400-500]$

W 20-tu żłobkach (4) wirnika (2) są umieszczone pręty uzwojenia klatkowego odlanego z aluminium z jednakowymi pierścieniami zwierającymi po obu stronach rdzenia wirnika, o wysokości przekroju pierścienia wynoszącym 8,2 mm oraz szerokości przekroju wynoszącej 8,0 mm, przy warunku, że średnica zewnętrzna (d) wirnika (3) jest równa średnicy zewnętrznej pierścienia klatki (d_{pr}) po operacji szlifowania powierzchni cylindrycznej wirnika w celu uzyskania wymaganej szerokości szczeliny powietrznej stojan – wirnik.

Magnesy umieszczone w wycięciach (5) i (6) blach (3) są obecnie najsilniejszymi magnesami trwałymi Nd-Fe-B, (Neodym – żelazo – bor).

Pozostałe elementy silnika takie jak: obudowa, wał, łożyska z gniazdami łożyskowymi, skrzynka przyłączeniowa, wentylator, a także technologie ich wykonania są takie jak w produkowanym silniku indukcyjnym, typu 3SIE80-4B, z tym, że długości obudowy i wału zostały dostosowane do mniejszej długości silnika LSPMSM według wynalazku.

Proces technologiczny wykonania LSPMSM praktycznie nie różni się od wykonania odpowiedniego silnika indukcyjnego, za wyjątkiem procesu umieszczania i zabezpieczenia magnesów trwałych w wirniku. Magnesy są mocowane w wycięciach (5) i (6) przy pomocy specjalnego kleju, którego celem jest nie tylko umocowanie magnesów, ale także zapewnienie równomiernego kontaktu między odpowiednimi powierzchniami magnesów oraz wycięć w rdzeniu wirnika, w celu wyeliminowania lokalnych naprężeń mechanicznych.

Silnik wykonany wedle wynalazku osiąga wyższe parametry energooszczędnościowe (sprawność prototypu zmierzona metodą input-output wynosi 88,67%) i jest wyższa od np. silnika indukcyjnego wysokosprawnego, o najwyższej sprawności dostępnej na rynku (klasa IE 3, $\eta_N = 82,5\%$). Po obniżeniu napięcia zasilającego do 330 V, co jest dopuszczalne wobec stosunkowo wysokiej przeciążalności znamionowej, sprawność rośnie do ok. 89,0%, a współczynnik mocy do ponad 93%. Jedną z podstawowych zalet silnika według wynalazku jest wybór minimalnego „wzniosu wału”, czyli odległości osi wirnika od podstawy fundamentu silnika. Odległość ta równa 80 mm jest najmniejsza ze wszystkich silników tego typu, o podanej wyżej sprawności, będących aktualnie w użyciu. Pozwala to, co jest niezwykle ważne w zastosowaniach komercyjnych, na zwiększenie stopnia kompaktowania urządzeń, w których silniki LSPMSM znajdują zastosowanie.

Silnik nadaje się do wszelkiego rodzaju napędów, jednak swoje własności manifestuje szczególnie w napędach stosowanych w ruchu ciągłym, zwłaszcza pracujących w trybie 24/7, np. w napędach wentylatorowych, pomp itp. Ze względu na własność samorozruchu stosowanie silników według wynalazku jest korzystniejsze od stosowania silników synchronicznych, a ze względu na wysoką sprawność silników według wynalazku – wyższą od silników indukcyjnych, stosowanie ich jest również korzystniejsze od stosowania silników indukcyjnych.

Zastrzeżenia patentowe

1. Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim posiadający rdzeń stojana złożony z jednakowo wykrojonych blach prądnicowych o kształcie pierścienia z wycięciami technologicznymi, z równomiernie rozłożonymi na obwodzie rdzenia półzamkniętymi żłobkami, w których jest umieszczone uzwojenie stojana, oraz

- rdzeń wirnika złożony z jednakowo wykrojonych blach prądnicowych, z otworami żłobków, w których umieszczona jest klatka wirnika oraz z wykrojonymi otworami, w których zamocowane są magnesy trwałe o konfiguracji U, **znamienny tym**, że w blachach prądnicowych (3) rdzenia wirnika, znajdują się cztery wycięcia styczne (5) stanowiące gniazda stycznych magnesów trwałych oraz cztery wycięcia promieniowe (6), stanowiące gniazda promieniowych magnesów trwałych, przy czym najmniejsza odległość (h_{m1}) krawędzi wycięć stycznych (5) od wału (7) jest większa niż 1,65 mm i mniejsza niż 1,75 mm i korzystnie wynosi 1,7 mm, zaś układ **U** dla 4-ech biegunów tworzą 4 jednakowe magnesy trwałe umieszczone w czterech wycięciach stycznych wirnika (5) i spolaryzowane prostopadle do osi wzdłużnej wycięcia, oraz 4 jednakowe magnesy trwałe umieszczone w wycięciach promieniowych (5) i spolaryzowane w kierunku prostopadłym do ich osi wzdłużnej, tworząc 4 bieguny magnetyczne odpowiadające polu wirującemu stojana, nadto w blachach prądnicowych (3) znajduje się 20 jednakowych i równomiernie rozłożonych na obwodzie blachy prądnicowej wirnika (3) zamkniętych okrągłych żłobków (4), w których, po złożeniu blach i uformowaniu rdzenia umieszczone jest, odlane z aluminium uzwojenie klatkowe wirnika a mostek stanowiący odległość pomiędzy krawędzią otworu żłobka zamkniętego (4) a krawędzią blachy wirnika (3) oraz mostek stanowiący odległość pomiędzy krawędzią otworu żłobka zamkniętego (4) a krawędzią otworu dla magnesów promieniowych (6) są identyczne ($h_{r1} = h_{r2}$) i są większe niż 0,40 mm i mniejsza niż 0,45 mm i korzystnie wynoszą 0,40 mm, natomiast mostki stanowiące odległość pomiędzy otworami dla magnesów (5) i (6) mają szerokość (h_{m2}), która mieści się w przedziale [0,50–0,55] mm, korzystnie 0,5 mm a otwór dla magnesów promieniowych ma zarys strzałki i zakończony jest grotem, w kształcie prostokątnego trójkąta równoramiennego skierowanego wierzchołkiem, zawierającym kąt prosty, w stronę środka okręgu opisanego na blasze prądnicowej wirnika oraz ramionach równych szerokości otworów dla magnesów trwałych.
2. Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że wycięcia styczne (5) stanowiące gniazda stycznych magnesów trwałych mają długości (l_{m1}) w przedziale [28,3–28,5] mm, korzystnie 28,4 mm, oraz szerokości (b_{m1}) w przedziale [2,15–2,25] mm, korzystnie 2,2 mm natomiast wycięcia promieniowe (6) stanowiących gniazda promieniowych magnesów trwałych mają długości (l_{m2}) w przedziale [5,6–5,8] mm, korzystnie 5,8 mm, oraz szerokości (b_{m2}) w przedziale [2,15–2,25] mm, korzystnie 2,2 mm.
 3. Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że w wycięciach (5) i (6) blach (3) są umieszczone magnesy trwałe Nd-Fe-B.
 4. Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że w 20-tu okrągłych żłobkach (4) wirnika (2) są umieszczone pręty uzwojenia klatkowego odlanego z aluminium o średnicy pręta (b_2) w przedziale [6,2–6,3] mm, korzystnie 6,2 mm, z jednakowymi pierścieniami zwierającymi po obu stronach rdzenia wirnika, o wysokość przekroju pierścienia w przedziale [8,1–8,3] mm, korzystnie 8,2 mm oraz szerokości przekroju w przedziale [7,9–8,1] mm, korzystnie 8,0 mm, przy warunku, że średnica zewnętrzna (d_1) wirnika jest równa średnicy zewnętrznej pierścienia klatki (d_{pr}).
 5. Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że blachy ograniczające rdzeń wirnika (11) znajdujące się na początku i na końcu stosu blach prądnicowych, z których składa się wirnik posiadają wykrój analogiczny jak blach (3) przy czym długość (l_{m3}) wcięć promieniowych (12) jest mniejsza niż w blachach (3) i ma wymiar który mieści się w przedziale [2,7–2,9] mm, korzystnie wynosi 2,8 mm.
 6. Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że rdzeń wirnika ma długości [80,0–100,0] mm i jest złożony z jednakowo wyciętych blach prądnicowych (3) o średnicy zewnętrznej (d_1) w przedziale [69,9–70,1] mm, korzystnie 70,0 mm, oraz o średnicy wewnętrznej (d_x) w przedziale [26,0–26,1] mm, korzystnie 26,0 mm, odpowiadającej średnicy wału (7) silnika.
 7. Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że posiada rdzeń stojana o długości takiej

samej jak rdzeń wirnika, tzn. [80,0–100,0] mm, złożony z jednakowo wykrojonych blach prądnicowych (1) o średnicy zewnętrznej (d_{se}) w przedziale [119,8–120,0] mm, korzystnie 120 mm oraz o średnicy wewnętrznej (d_s) w przedziale [70,4–70,6] mm, korzystnie 70,5 mm, z 24 jednakowymi i równomiernie rozłożonymi na obwodzie blachy rdzenia półzamkniętymi żłobkami (2), w których, po uformowaniu rdzenia jest umieszczone uzwojenie stojana, przy czym wymiary żłobka (2) wynoszą

- szerokość zęba stojana (b_{ds}) – w przedziale [3,75–3,85] mm, korzystnie 3,8 mm,
 - szerokość podstawy żłobka (b_{3s}) – w przedziale [9,15–9,25] mm, korzystnie 9,2 mm,
 - szerokość przyszczelinowej części żłobka (b_{2s}) – w przedziale [5,6–5,8] mm, korzystnie 5,7 mm,
 - szerokość otwarcia żłobka (b_{1s}) – w przedziale [2,3–2,4] mm, korzystnie 2,3 mm,
 - wysokości strefy domknięcia żłobka (h_{1s}) – w przedziale [0,45–0,55] mm, korzystnie 0,5 mm, oraz (h_{2s}) – w przedziale [0,35–0,45] mm, korzystnie 0,4 mm,
 - wysokość aktywnej części żłobka (h_{23s}) – w przedziale [13,75–13,85] mm, korzystnie 13,8 mm,
 - promień zaokrągleń technologicznych ($R1.0$) – w przedziale [0,9–1,1] mm, korzystnie 1,0 mm,
 - promień zaokrągleń technologicznych ($R0.2$) – w przedziale [0,15–0,25] mm, korzystnie 0,2 mm,
 - promień zaokrągleń technologicznych ($R0.5$) – w przedziale [0,45–0,55] mm, korzystnie 0,5 mm.
8. Obwód elektromagnetyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że podwójna szerokość szczeliny powietrznej pomiędzy wirnikiem a stojanem równa ($d_s - d_r$) ma wymiar w przedziale [0,45–0,55] mm, korzystnie 0,5 mm.
9. Obwód elektromagnetyczny silnika indukcyjnego według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że przy wzniosie osi wału 80 mm, stosunku średnicy zewnętrznej do wewnętrznej rdzenia stojana równej $d_{se}/d_s=120/70,5$, oraz wymiarach podanych w zastrzeżeniach 1–8, stosunek długości rdzenia stojana do jego średnicy zewnętrznej jest nie mniejszy od wartości $l/d_{se}=0,58$.

Rysunki

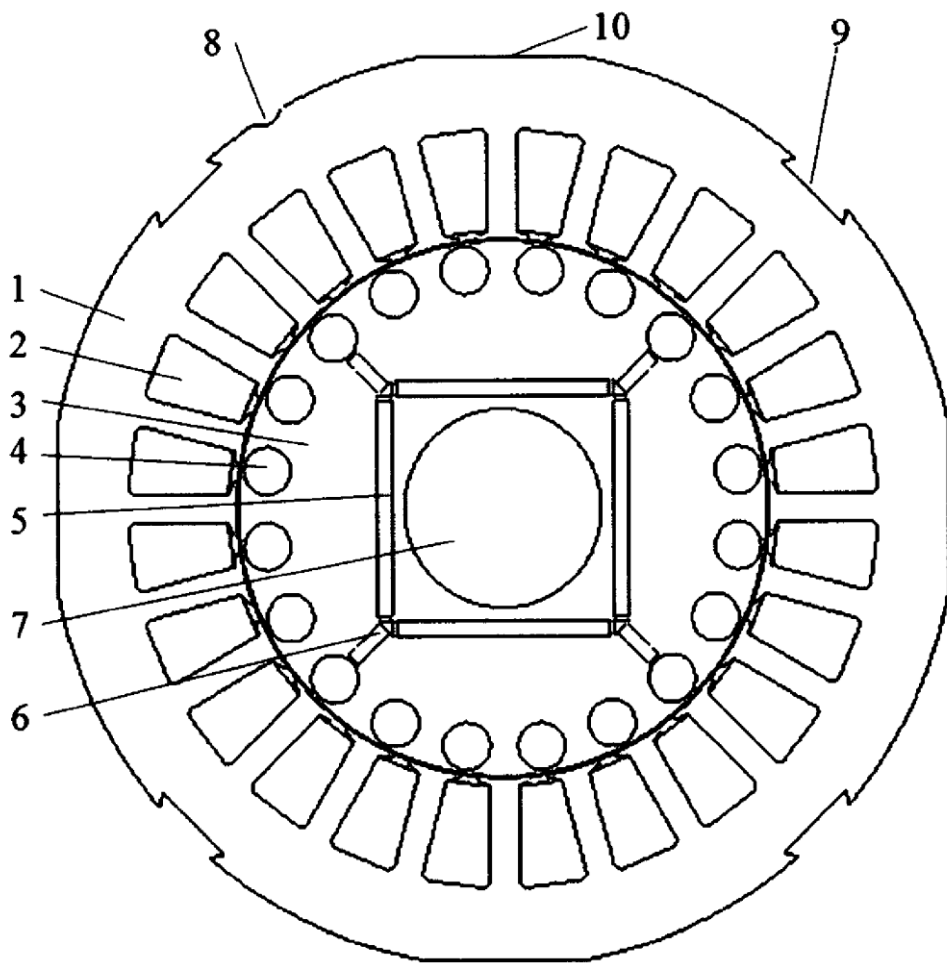
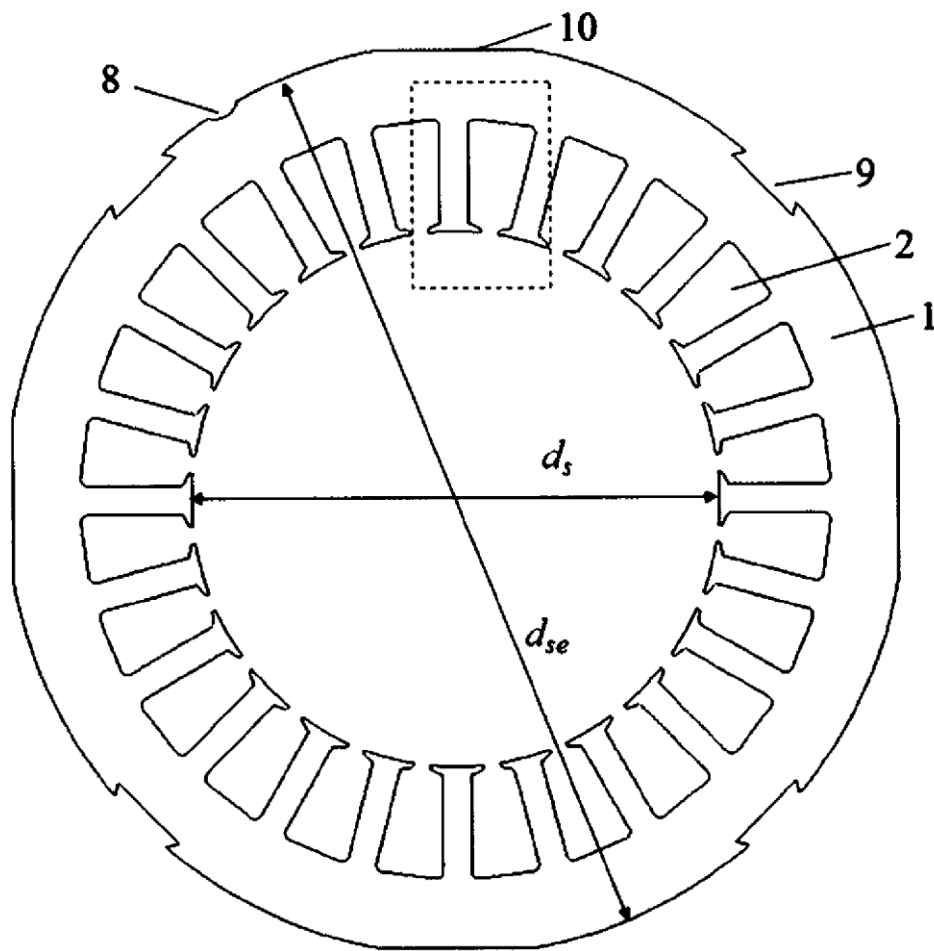


Fig. 1

**Fig. 2**

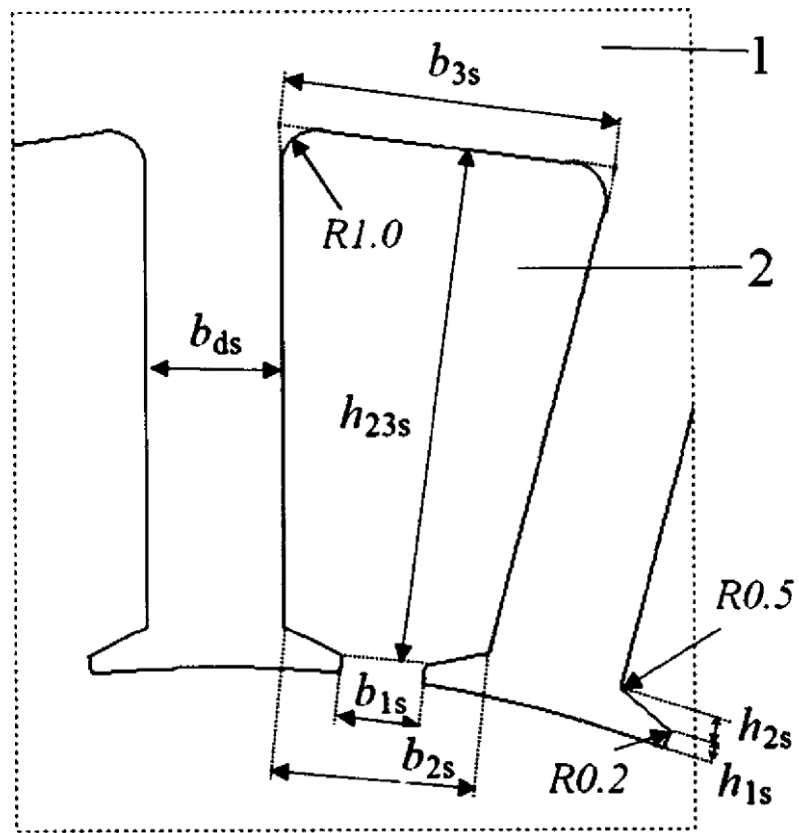


Fig. 3

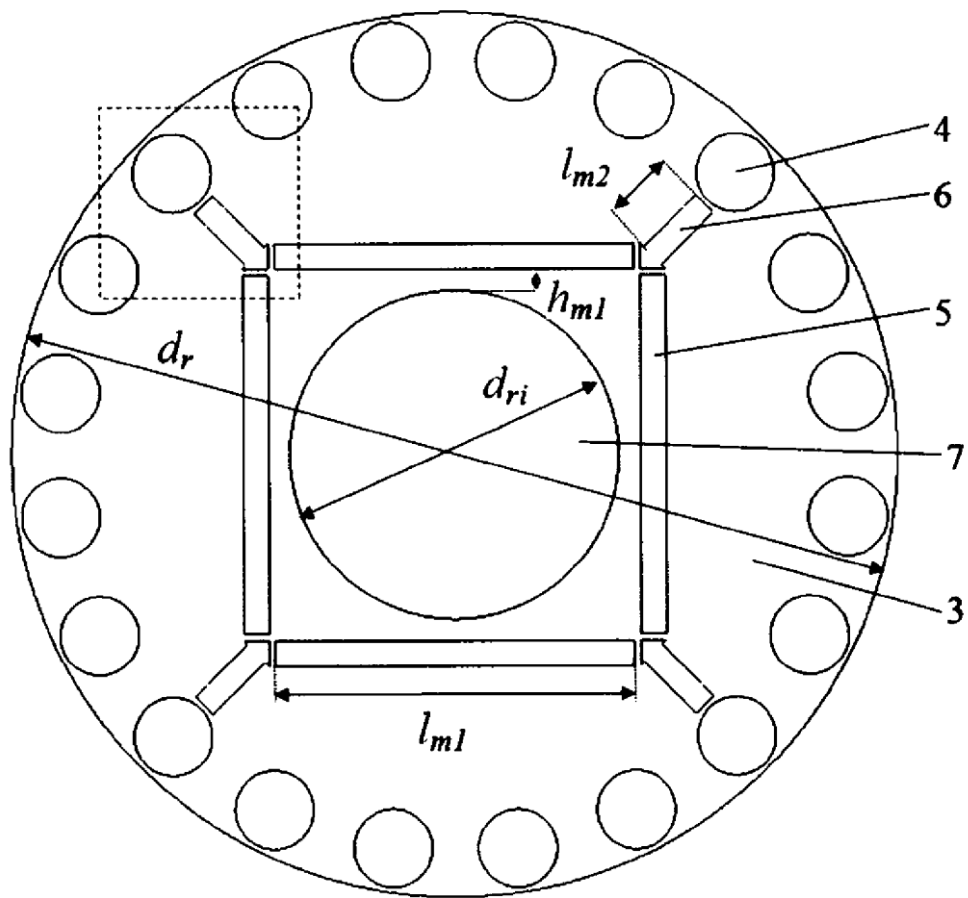


Fig. 4

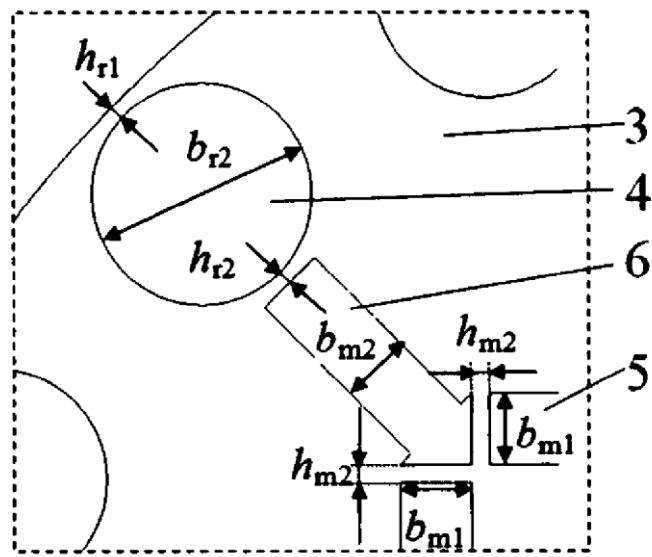
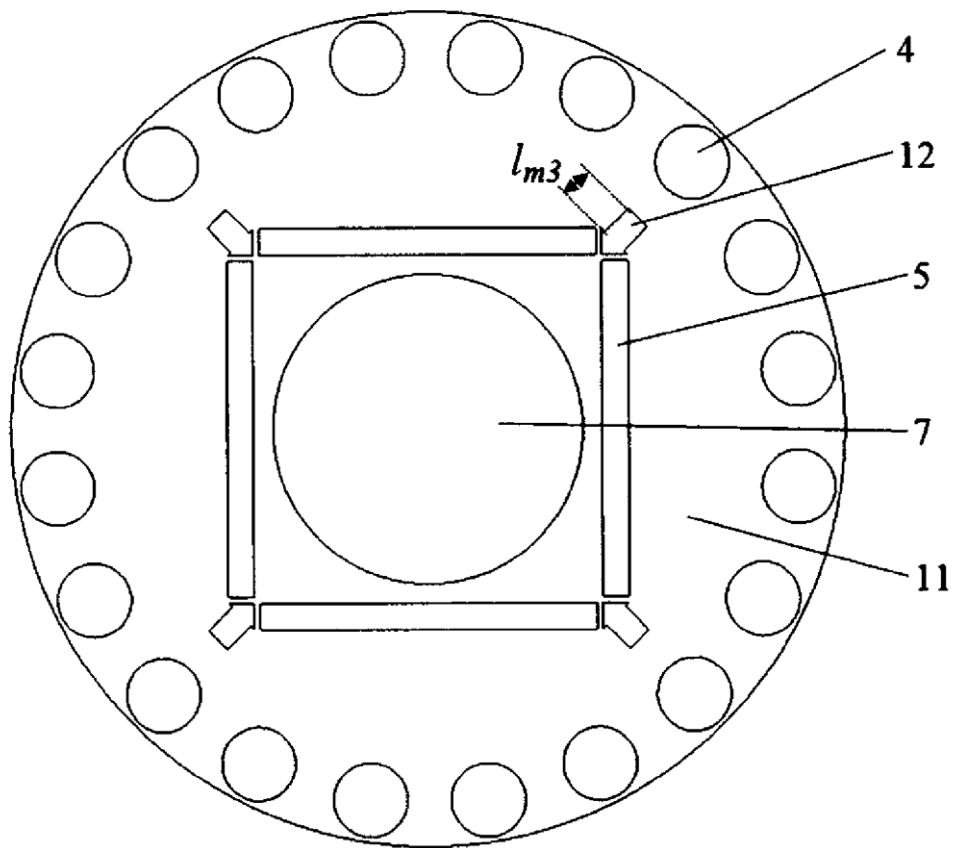


Fig. 5

**Fig. 6**