

doi:10.15199/48.2017.02.18

Silniki elektryczne o ruchu złożonym z zastosowaniem samohamownej przekładni gwintowej

STRESZCZENIE W artykule przedstawiono różne rodzaje konstrukcji silników elektrycznych z wirnikami zintegrowanymi z gwintową przekładnią samohamowną lub specjalnymi układami mechanicznymi prowadnic umożliwiającymi ruch: liniowy, obrotowy lub liniowo-obrotowy członu wykonawczego. Charakterystyczną cechą tego ruchu jest duża precyzja pozycjonowania oraz duże wartości sił ciągu. Podstawowe węzły konstrukcyjne tych maszyn, wybrane wyniki pomiarów podstawowych parametrów eksploatacyjnych oraz symulacje ich ruchów będą przedstawione podczas prezentacji.

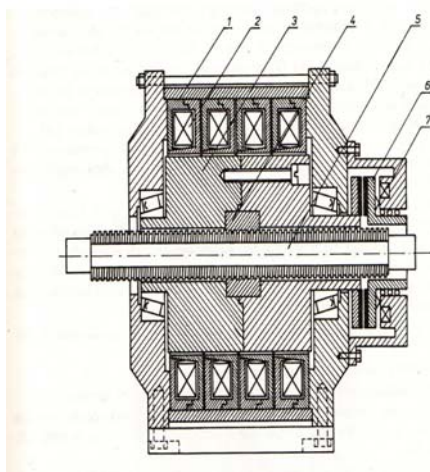
Summary In the paper different constructions of electrical machines with rotor integrated with self-brake thread gear or special structures of mechanical slideways that enable linear, rotary or linear-rotary movement of drive unit is presented. Characteristic feature of this movement is high precision positioning and high values of draw force. Basic constructional nodes of these machines, selected results of performed measurement of basic exploitation parameters and movement simulations are to be presented. **Electrical machines with rotor integrated with self-brake thread gear**

Słowa kluczowe: elektrotechnika, maszyny elektryczne, silniki o ruchu złożonym, przekładnie gwintowe samohamowne

Keywords: electrical engineering, electrical machines, composite-movement electrical machines, self-brake thread gear.

Wstęp

Współczesne rozwiązania konstrukcyjne robotów, obrabiarek sterowanych numerycznie, pojazdów wodnych lub powietrznych wymagają zastosowania osobliwych silników napędowych. Podstawowymi wymaganiami dla tego rodzaju napędów są możliwości realizacji ruchu w wielu stopniach swobody, łatwość sterowania, zwartość i prostota konstrukcji. Istnieje również potrzeba w wielu wypadkach zapewnienie dużej dokładności pozycjonowania oraz niezawodności działania, a ponadto możliwość uzyskania dużych wartości sił poosiowych ciągu członów napędowych. Wprowadzenie dodatkowo sprzęgieł elektromagnetycznych z układami gwintów samohamownych powoduje ubogacenie złożoności ruchu członów wykonawczych. Maszyny Elektryczne nigdy nie są elementami samodzielnymi, lecz są częścią bardziej złożonych układów gdzie odpowiedzialne są za przekształcenie energii. Współczesna technika nie ogranicza się w konstrukcjach tylko maszyn wirujących, coraz częściej mamy do czynienia z maszynami liniowymi jak i wykonującymi ruch złożony o wielu stopniach swobody, jest to odpowiedź konstruktorów na coraz to nowe wyzwania stawiane im przez przemysł.



Rys. 1. Silnik liniowy obrotowy ze sprzęgłem: 1 – obwód magnetyczny wzbudnika – typ pazurkowy, 2 – cewka krążkowa, 3 – wirnik reluktancyjny, 4 – tuleja z gwintem, 5 – wałek gwintowany (człon wykonawczy), 6 – tarcza sprzęgła z tuleją wieloklinową, 7 – elektromagnes

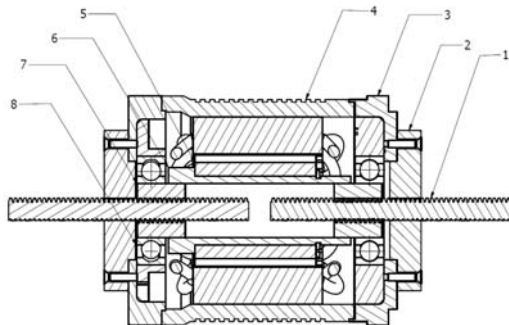


Rys. 2. Model silnika o ruchu liniowym lub obrotowym

Silniki o ruchu liniowym lub obrotowym

Cechą charakterystyczną tego rodzaju konstrukcji jest sprzężenie śrub mechanicznych z wirnikami silników elektrycznych, układu sprzęgieł elektromagnetycznych oraz układami sterowania. W układach sprzężonych można bowiem uzyskać spotęgowanie parametrów eksploatacyjnych urządzeń (pod względem precyzji pozycjonowania oraz siły lub momentu). Przykład jednego z wielu rozwiązań konstrukcyjnych przedstawia rysunku 1. W celu uzyskania w miarę precyzyjnego pozycjonowania członu wykonawczego w ruchu obrotowym oraz dokładnego pozycjonowania tego członu przy jednoczesnym uzyskaniu dużych wartości sił osiowych w ruchu liniowym wykorzystać można reluktancyjny silnik skokowy lub silnik typu SRM. Wirnik składa się z cylindrycznie ułożyskowanej

zewnątrznie stalowej tulei wykonującej ruch obrotowy. W otworze wewnętrznym tulei umocowana jest tulejka z gwintem. Elementem wykonującym ruch liniowy lub obrotowy jest wieloklinowy gwintowany wałek stanowiący człon wykonawczy. Elementem dokonującym zmiany ruchu członu wykonawczego jest tarcza sprzęgła elektromagnetycznego z wewnętrznym wieloklinowym otworem, przez który przechodzi gwintowany wałek. W tarczy łożyskowej umocowana jest wieloklinowa tuleja oraz elektromagnes sprzęgła. Człon wykonawczy wykonuje ruch: obrotowy jeżeli tarcza sprzęgła z wieloklinową tuleją dociska do tulei wirnika, liniowy jeżeli tarcza sprzęgła przy włączeniu elektromagnesu dociska do tarczy łożyskowej. Przykład konstrukcji tego typu silnika zastosowanego do napędu zaworu pary przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 3. Konstrukcja silnika reluktancyjnego typu „śruba rzymska” 1 biegnik; 2 ogranicznik; 3 tarcza; 4 stojan; 5 pakiet blach; 6 wał; 7 nakrętka; 8 łożysko

Silnik o ruchu złożonym typu „śruba rzymska”

Silnik o ruchu złożonym typu „Śruba Rzymska” należy do rodziny silników z przekładnią samohamowną zapewniającą zmianę ruchu obrotowego na ruch liniowy. Konstrukcja tego typu maszyn podyktowana jest możliwością zastąpienia nimi kłopotliwych w eksploatacji siłowników pneumatycznych i hydraulicznych w których układach występują wycieki medium napędowego oraz konieczne jest stosowanie pomp zwykle napędzanych maszynami elektrycznymi. Innym miejscem zastosowań tego typu maszyn jest zastosowanie ich w dziedzinie obrabiarek CNC szczególnie tam gdzie wymagane jest centrowanie elementów bądź zmiana długości cięgien.

Od klasycznej wirującej maszyny reluktancyjnej odróżnia go głównie wykonanie wału wirnika, gdyż ten wykonano w formie tulei w której umieszczono podzespoły przekładni w postaci elementu gwintowanego wewnątrz współpracującego z biegnikiem śrubowym. Łożyskowanie wału nie odbiega znacząco od wykonania klasycznego przy czym łożyska współpracują bezpośrednio z elementem przekładniowym i na nim to oparty jest wał maszyny, ma to na celu zapewnienie lepszego centrowania przekładni oraz ograniczenia ruchów poprzecznych biegnika. Przekładnia samohamowna wykonana jest w postaci zespołu trapezowej śruby napędowej współpracującej z nakrętką wchodzącą w skład wirnika. Wirnik kompletny zawiera w sobie dwa zespoły przekładni w celu umożliwienia symetrycznej pracy biegników maszyny. Aby zapewnić jej poprawną pracę biegniki zabezpieczone są przed obrotem specjalnymi ogranicznikami pełniącymi również rolę łożysk ślizgowych na których oparto biegnik. W celu ograniczenia ruchów poprzecznych biegnika element ten może być zastąpiony poprzez większą liczbę podzespołów oddzielnie pełniących funkcję ogranicznika ruchu obrotowego i łożyskowania. Możliwość zastosowania materiałów ceramicznych umożliwia kształtowanie tych podzespołów w wielu wariantach dostosowanych do potrzeb klientów

szczególnie gdy potrzebna jest odporność na działanie sił poprzecznych lub wysoka precyzja ruchu. Przy stosowaniu silników skokowych możliwe jest pozycjonowanie tego typu maszyn rzędu pojedynczych mikrometrów co wymaga jednak zespołu napędowego wykonywanego jako wysokiej klasy para precyzyjna. Istotną wadą tej maszyny jest ograniczony skok wynikający z długości maszyny, dużym polem do badań jest możliwość zastosowania przekładni śrubowych w wykonaniu wielostopniowym tak aby jeden z biegników miał formę śrubową a drugi miałby formę elementu o gwincie wewnętrznym w który to mógłby się chować drugi biegnik.



Rys. 4. Model silnika typu „śruba rzymska”

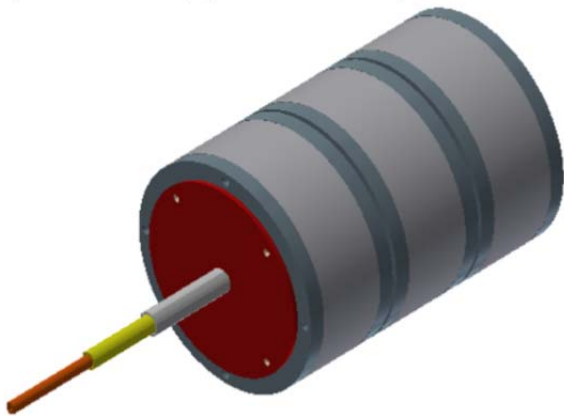


Rys. 5. Silnik typu „śruba rzymska” z układem sterowania

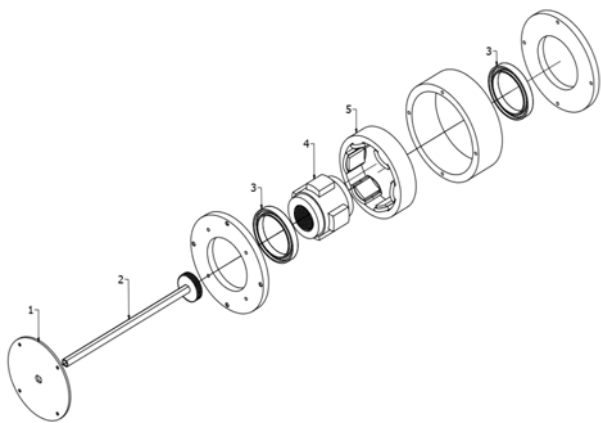
Trójczłonowy silnik przełączalny o ruchu złożonym

Prezentowany silnik zbudowany jest modułowo z trzech silników skokowych lub silników reluktancyjnych typu SRM. Takie rodzaje silników umożliwiają uzyskanie dużej precyzji pozycjonowania, która wymagana była w założeniach projektu silnika. Każdy pojedynczy silnik złożony jest z sześć-biegunowego stojana, na którym umieszczone są uzwojenia skupione oraz cztero-biegunowego wirnika. Każdy wirnik posiada otwór wewnątrz nagwintowany, w który wkręcana jest nagwintowana zewnętrznie nakrętka z elementem wykonawczym. Ze względu na budowę kompletnego silnika przedstawionego na rysunku 6 poszczególne silniki różnią się względem siebie wymiarami elementów wykonawczych jak i wymiarami otworów w blokadach. Elementy wykonawcze w silnikach wyróżnione zostały na poniższym rysunku poprzez zastosowanie kolorów. W kolejnych silnikach elementy te mają coraz większe wymiary oraz dwie z trzech nakrętek posiadają otwory przelotowe, aby poszczególne człony wykonawcze były w stanie przechodzić przez siebie jak na rysunku 6. Prezentowany silnik wykonuje ruch w dwóch stopniach swobody. Ruch obrotowy odbywa się poprzez sekwencyjne załączanie uzwojeń na kolejnych parach biegunów stojana. Wytworzone pole magnetyczne zamyka się przez zęby

wirnika, a następnie przez jego jarzmo oraz zęby i jarzmo stojana powodując przy odpowiedniej kolejności załączeń par uzwojeń jego obrót. Ruch liniowy, którego siła na wyjściu jest najistotniejszym parametrem silnika, odbywa się z wykorzystaniem sprzężenia mechanicznego wirnika z nakrętką (przekładnia samohamowna śrubowa). Wytworzony ruch obrotowy wirnika poprzez gwint wymusza na nakrętce ruch liniowy w kierunku zależnym od kierunku obrotów. Zastosowanie tego typu przekładni umożliwia zwiększenie siły uzyskiwanej w ruchu liniowym. Dodatkowo w celu uniknięcia niepożądanego obrotu nakrętki w trakcie pracy silnika elementy wykonawcze są wieloklinowe. Na początku każdego z silników składowych znajduje się blokada której otwór odpowiada kształtowi i wymiarowi członu wykonawczego danego silnika, dzięki czemu ruch obrotowy elementu wykonawczego staje się niemożliwy. Sterownie każdego z silników składowych odbywa się indywidualnie co umożliwia wykonanie różnej pracy przez trzy niezależne względem siebie układy.



Rys. 6. Widok modelu trójczłonowego silnika o ruchu złożonym

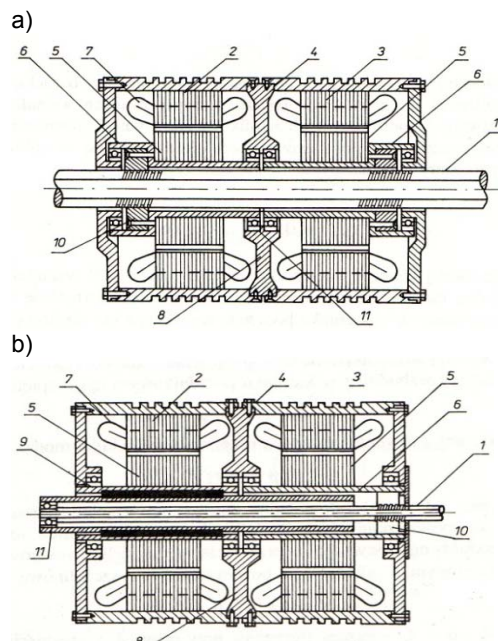


Rys. 7. Widok elementów składowych pojedynczego silnika :1- tarcza zewnętrzna z otworem wieloklinowym; 2- człon wykonawczy wieloklinowy; 3 –łożyska; 4- wirnik; 5- stojan

Budowa i zasada działania silnika skokowego o ruchu złożonym

Realizacja dokładnego pozycjonowania jest możliwa w tych konstrukcjach jeżeli zastosowany będzie silnik typu skokowego lub silnik SRM oraz zastosowanie odpowiedniego skoku gwintu przekładni samohamownej. Obiektem wokół którego skupia się tematyka rozważań jest liniowo-obrotowy silnik skokowy. Model silnika został wykonany w Instytucie Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej. Według wcześniej przedstawionej klasyfikacji, jest to jednostka o strukturze cylindrycznej, posiadająca dwa niezależne wzбудniki. Tyimi wzбудnikami

są dwa silniki skokowe w wersji hybrydowej. Zastosowanie silników skokowych umożliwia - przy odpowiednich warunkach obciążenia - pracę bez sprzężeń zwrotnych, co dodatkowo upraszcza układ sterowania. Oba wzбудniki wytwarzają pole magnetyczne wirujące, zmieniające położenie dzięki przełączaniu zasilania pomiędzy kolejnymi pasmami sterującymi uzwojeń. Między wzbudnikami znajduje się tuleja, która wraz ze śrubami, służy utrzymaniu wzbudników w jednej, określonej pozycji względem siebie. Na rysunku 8 przedstawione są dwie wersje konstrukcyjne silników o ruchu złożonym z możliwością precyzyjnego pozycjonowania w ruchu obrót i liniowym. Silniki te mogą wykonywać ruchy składowe niezależnie, bądź w zależności od sposobu sterowania. Silniki w wersji I i II charakteryzują się że ruch obrotowy i postępowy wykonywany jest przez jeden wałek (1). Silniki w wersji I i II zbudowane są: ze wzbudników (2), (3), zamocowanych w obudowach (4) i wirników (5), osadzonych na tulejach (6), ułożyskowanych w tarczach łożyskowych zewnętrznych oraz na wspólnej tarczy łożyskowej W wersji ruch obrotowy wałka (1) powodowany jest obracającym się wirnikiem (5), sterowanym wzbudnikiem (3) z uzwojeniem (7), z wykorzystaniem przez go połączenia wieloklinowego (9). Połączenie to umożliwia również ruch wałka (1), będący wynikiem ruchu obrotowego wirnika (5), sterowanego wzbudnikiem (2), z wykorzystaniem obracającej się wraz z tuleją (6) tulei gwintowanej na gwintowanym wałku (1). Uniezależnienie ruchu liniowego i obrotowego realizuje łożysko oporowe (11). W wersji II silnika, ruch obrotowy wałka powoduje obracającą się tuleję pędzącą, napędzana wirnikiem (5), sterowanym wzbudnikiem (2). Ruch liniowy wynika z jego obracania się względem nagwintowanej tulei (10), zespolonej wirnikiem. Prędkość ruchu postępowego jest w tej konstrukcji proporcjonalna do różnicy prędkości obrotowych obu wirników, niezależnie napędzających (1) i gwintowaną tuleję (10).



Rys. 8. Silnik o ruchu liniowo-obrotowym (oznaczenia w tekście): a) wersja I; b) wersja II

Silniki w wersji I i II wyróżniają się następującymi cechami użytkowymi i parametrami eksploatacyjnymi
 — mają wspólną wewnętrzną tarczę łożyskową,
 — wykonują niezależnie ruch obrotowy, postępowy lub oba ruchy łącznie,

- prędkość ruchu obrotowego wałka może być płynnie regulowana co do kierunku i wartości przez odpowiednie sterowanie wzбудnika (3), (wersja I) lub (wersja II),
- maksymalna prędkość ruchu postępowego wałka silnika w wersji II jest proporcjonalna do sumy prędkości przeciwnie wirujących wirników, zakres regulacji jest tu zatem dwukrotnie większy w porównaniu z podobnymi silnikami jednym wzbudnikiem, Wyjątkowo precyzyjne pozycjonowanie wałka w ruchu postępowym silnika uzyskać można przy jednakowych co do kierunku i zbliżonych i wartości prędkości obrotowych obu wirników.

Możliwe ruchy wałka (3) odbioru napędu dla różnych ruchów wirników przedstawia Tabela 1.

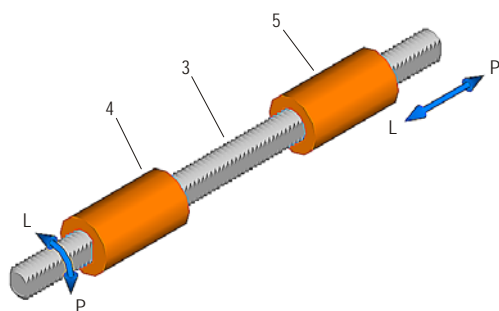
Parametry eksploatacyjne silnika

Zakres regulacji prędkości obrotowej modelu silnika zależy od odpowiedniego sterowania wzbudnika

1. W przypadku silnika skokowego

$$(1) \quad n_{2\max} = \frac{S_1 f_g}{2\pi}$$

gdzie: S_1 – skok jednostkowy, f_g – częstotliwość graniczna napięcia zasilania silnika skokowego.



Rys. 9. Wałek i tuleje prowadzące

Tabela 1. Ruch wałka w zależności od ruchu wirników

Ruch wirników (obroty)		Ruch wałka gwintowanego				
Wirnik (4)	Wirnik (5)	obrotowy L	obrotowy P	liniowy L	liniowy P	Z
L	L	+				
P	P		+			
Z	Z					+
L	P	+		+		
P	L		+		+	
Z	L				+	
Z	P			+		
L	Z	+		+		
P	Z		+		+	

L – ruch w lewo, P – ruch w prawo, Z - zatrzymany

W ruchu liniowym istnieje możliwość regulacji prędkości w zakresie:

$$(2) \quad |V| < S_g (n_{1\max} + n_{2\max})$$

gdzie: S_g – skok gwintu wałka, $n_{1\max}$ – maksymalna prędkość obrotowa wirnika 1, $n_{2\max}$ – maksymalna prędkość obrotowa wirnika 2. Należy zaznaczyć, że maksymalna prędkość osiągana jest przy przeciwnych kierunkach wirników względem stojana silnika. Kątowy skok wirnika silnika przy wykonywaniu ruchu obrotowego równy jest skokowi znamionowemu wirnika wzbudnika (2). Elementarny skok liniowy wałka ΔS_g przy skoku obrotowym wzbudnika (1) wyraża się wzorem:

$$(3) \quad \Delta S_g = (S_{w1} \mp S_{w2}) \frac{P}{360}$$

gdzie: S_{w1} – elementarny kątowy skok wirnika 1 w stopniach, S_{w2} – elementarny kątowy skok wirnika 2 w stopniach, P – skok gwintu w milimetrach.

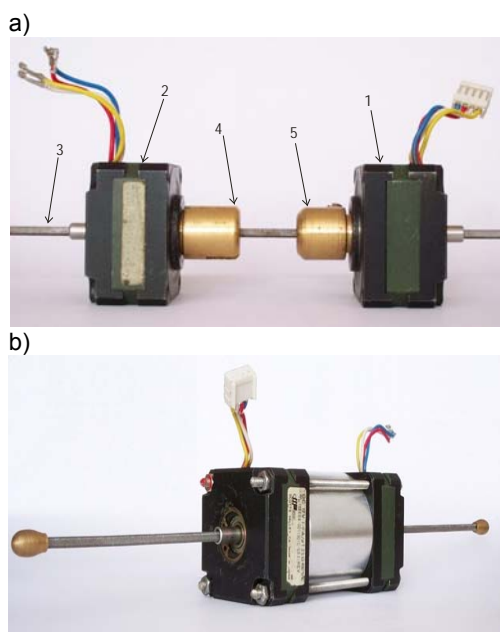
Znak plus stosuje się dla przeciwnego ruchu wirników, znak minus dla ruchu zgodnego.

Korzystając z warunku samohamowności siła poosiowa przy wytworzonym momencie T silnika:

$$(4) \quad F = \frac{T}{0,5 \times d_s \times \tan(\gamma - \rho')}$$

gdzie: T – moment silnika, λ – kąt wzniosu osi śrubowej, d_s – średnia wartość średnicy gwintu, ρ – współczynnik tarcia.

Przykładowe zastosowanie silników skokowych hybrydowych jako podstawowy węzeł konstrukcyjny silnika o ruchu złożonym przedstawia rysunek 9.



Rys.9. Modele silnika liniowo-obrotowego typu skokowego: a – odseparowane silniki modułowe, b – zintegrowany model silnika liniowo-obrotowego

W obu wzbudnikach na rysunku 9 wirniki osadzone są na tulejach, łożyskowanych indywidualnie przy każdym ze wzbudników. Oba wirniki łączy gwintowany, spłaszczony wałek (3). Ruch obrotowy wałka powodowany jest poprzez obracający się wirnik wzbudnika (2) z wykorzystaniem przesuwnej połączenia wieloklinowego (4) tulei wirnika z wałkiem (3). Takie połączenie umożliwia ruch liniowy wałka, który powodowany jest przez obroty wirnika wzbudnika (1). Ruch liniowy powodowany jest przez obracanie się gwintowanej tulei (5) tego wirnika na gwintowanym wałku (3). Silnik nie posiada łożyska oporowego, które niezależnie od ruchu obrotowego. Niepożądanemu ruchowi jednego ze wzbudników zapobiega zasilanie obydwu wzbudników, niezależnie od tego, czy aktualnie wykonują ruch, czy nie.

Silnik o ruchu złożonym o wspólnym obwodzie magnetycznym

Prezentowana konstrukcja silnika o ruchu złożonym wykonana jest na strukturze o radialnym przepływie strumienia magnetycznego. Jest to silnik typu reluktancyjnego. W zależności od rodzaju sterowania może

pracować, jako maszyna skokowa, lub przełączalna (SRM). W budowie silnika można wyróżnić mechanizm liniowo-obrotowy w postaci wału z częścią gwintowaną oraz wielowypustową. Na końcach wału znajdują się tuleje wielowypustowa i nakrętka z gwintem trapezowym. Elementy te są wkomponowane w wały, na których osadzone są wirniki. Wyróżnia się dwa rodzaje wirników. Pierwszy wewnętrzny, jest poruszany w wyniku oddziaływania części wewnętrznej stojana. Drugi wirnik natomiast, jest typu zewnętrznego i jest napędzany dzięki obecności części zewnętrznej. Stojan składa się z zewnętrznej i wewnętrznej części zębowo-żłobkowej. Obie części połączone są wspólnym jarzmem. Rdzeń stojana składa się z pakietu blach elektrotechnicznych, sklejonych i spiętych śrubami przebiegającymi wzdłuż jarzma, które poprzez pierścień dystansujący przytwierdzają całość do tarczy łożyskowej. Wirniki są przewieszane i łożyskowane w pojedynczych tarczach łożyskowych. Łożyskowanie za pomocą łożysk kulkowych skośnych w układzie „o”, lub kulkowych.



Rys. 10. Model manipulatora o trzech stopniach swobody z silnikiem liniowo-obrotowym typu skokowego z rysunku 8 – wersja I

Podsumowanie

Przedstawione różne rozwiązania konstrukcyjne silników o ruchu złożonym z zastosowaniem przekładni śrubowej samohamownej zostały opracowane, w większości opatentowane i wykonane w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej.

Autorzy: Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński, e-mail: g.kamiński@ime.pw.edu.pl, Instytut Maszyn Elektrycznych Politechnika Warszawska, 00-660 Warszawa Pl. Politechniki 1, mgr.inż. Paweł Góralski, e-mail: Pawel.Goralski@orlen.pl, PKN ORLEN S.A., Michał Bursa, e-mail: bursam@ee.pw.edu.pl, student wydziału elektrycznego PW, Michał Domański, e-mail: michal170193@wp.pl, student wydziału elektrycznego PW

LITERATURA

- [1] Kamiński G., Góralski P., *Opis prac badawczych nad konstrukcją przetwornika położenia o ruchu złożonym o wspólnym obwodzie magnetycznym*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 66 Politechniki Wrocławskiej, Studia1 Materiały, nr 32, 2012
- [2] Kamiński G., Szczypior J., Koziej J., *Model matematyczny silnika reluktancyjnego przełączalnego z wirnikiem zewnętrznym*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka, 1998, z. 102, pp. 65-78.
- [3] Kamiński G., Góralski P., *Przetwornik elektromechaniczny o ruchu złożonym*. Zgłoszenie do Urzędu Patentowego PR, nr P-398483.
- [4] Kamiński G., Góralski P., *The electromagnetic calculations of complex motion common magnetic circuit electromagnetic converter*, Archives of Electrical Engineering, 2014, Vol. 63(1), pp. 125-133
- [5] Bursa M. Praca inżynierska „Konstrukcja silnika o ruchu złożonym typu „śruba rzymska”
- [6] Domański M. Praca inżynierska „Konstrukcja trójczłonowego silnika przełączalnego o ruchu złożonym”