

doi:10.15199/48.2019.09.06

## Konstrukcja silnika liniowego tubowego oraz stanowiska do badań silników liniowych

**Streszczenie.** Przedmiotem pracy są silniki liniowe indukcyjne, tubowe oraz transformatorowe. Przedstawiono praktyczną realizację silnika tubowego oraz zmiany wprowadzone w konstrukcji silnika transformatorowego i budowę stanowiska do badań obu maszyn. Zawarto wyniki pomiarów przeprowadzonych na rzeczywistych silnikach.

**Abstract.** In this paper a transformer type and a tubular type linear motors have been considered. The practical implementation of tubular motor, modifications introduced to the transformer-type motor and the laboratory stand arrangement are presented. Results of performed experiments are presented. (**Design of the tubular type linear motors**)

**Słowa kluczowe:** silnik liniowy, silnik tubowy, silnik transformatorowy

**Keywords:** linear motor, tubular motor, transformer-type motor

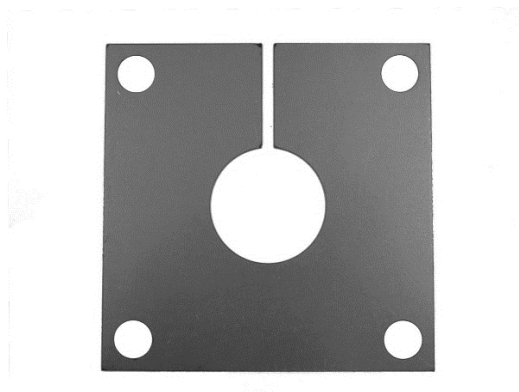
### Wstęp

Różnorodność ruchów układów napędowych często wymaga dopasowania struktury geometrycznej silnika napędowego. Jednym z takich przykładów jest napęd silnikiem liniowym, w którym istnieje możliwość ulepszenia parametrów eksploatacyjnych poprzez zmianę kształtowania jarzma wzbudnika i bieźnika. Przykładem takiej konstrukcji jest silnik liniowy typu tubowego. Ten typ silnika liniowego wykazuje najlepszą sprawność z powodu dużego udziału strefy aktywnej dla uzwojeń wielofazowych połączonych w gwiazdę lub trójkąt. Publikacja ta ma na celu przedstawienie w jaki sposób przy możliwie minimalnym zróżnicowaniu elementów rdzenia wzbudnika można uzyskać różne wariacje konstrukcji silnika liniowego. Porównywane będą głównie dwie konstrukcje, silnik liniowy typu transformatorowego oraz typu tubowego.

### Wykonanie silnika tubowego

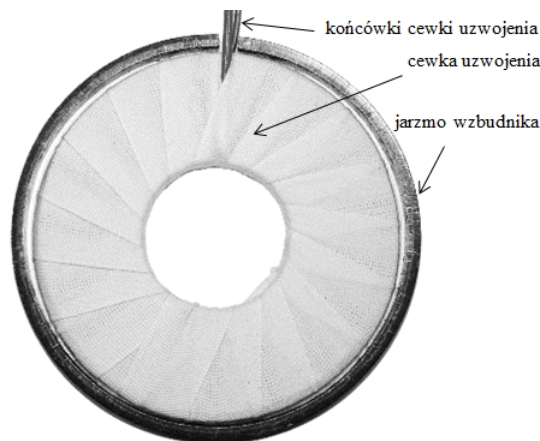
Silnik tubowy został zaprojektowany w sposób umożliwiający uzyskanie podobieństwa, pod względem objętości wykorzystanych materiałów, do wykonanego wcześniej silnika transformatorowego [1]. Części wzbudników obydwu silników ze względu na znaczne podobieństwo sprawiają wrażenie z zewnątrz pozornie identycznych. Budowę silnika tubowego rozpoczęto od doboru rury miedzianej stanowiącej twornik. Ze względu na konieczność zachowania rozsądnych kosztów konstrukcji, miedzianą część bieźnika dobrano z typoszeregu rur dostępnego w większości punktów handlujących materiałami metalowymi. Kolejnym krokiem było dopasowanie stalowego jarzma bieźnika tworzącego warstwę przewodnika strumienia magnetycznego w tworniku. Standardowy typoszereg rur nie oferował możliwości pozyskania rury o średnicy zewnętrznej równej średnicy wewnętrznej rury miedzianej tak by mogła ona być idealnie spasowana z warstwą miedzianą, dlatego wybrano element o średnicy zewnętrznej większej i poddano go obróbce, której efektem było zmniejszenie średnicy zewnętrznej do wymaganego rozmiaru.

Blachy (rys. 1) tworzące zęby wzbudnika wykonano ze stali węglowej zimnowalcowanej o aktualnym oznaczeniu DC01 i grubości 0,5 mm. Celem separacji poszczególnych blach oraz zabezpieczenia ich przed działaniem warunków atmosferycznych, każdą z nich obustronnie pokryto warstwą bezbarwnego lakieru na bazie żywicy akrylowej. Cewki krążkowe (rys. 2) nawinięto ręcznie za pomocą nawijarki na wzorniku identycznym do używanego podczas nawijania cewek użytych do budowy uzwojenia silnika transformatorowego. Zagwarantowało to uzyskanie takiej samej szerokości żłobka, a w efekcie i długości wzbudnika.



Rys. 1. Gotowa blacha zęba wzbudnika

Średnica kręgu wzornika, na którym przygotowywano cewki, została tak dobrana, aby po wyjęciu uzwojenia z wzornika, związaniu celem usztywnienia oraz owinięciu elektroizolacyjną taśmą cewka miała wewnętrzną średnicę nieco większą od średnicy zewnętrznej rury miedzianej. Wewnętrzną powierzchnię uzwojenia dodatkowo zabezpieczono podwójną warstwą preszpanu. Miedziany drut nawojowy w izolacji szklanej użyty do budowy cewek ma przekrój prostokątny. Technologia wykonania cewek była niemal identyczna jak podczas budowy silnika transformatorowego, z tą różnicą że pominięto użycie opasek termokurczliwych w miejscu zagięć drutów pod kątem 90° w celu wyprowadzenia końcówek cewek na powierzchnię wzbudnika. Jedna z cewek została zaopatrzona w czujnik temperatury typu termopara.



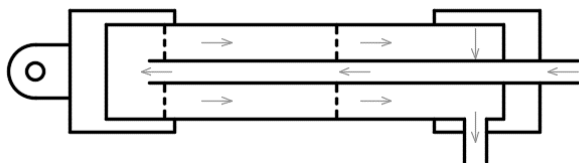
Rys. 2. Element jarzma wraz z gotową cewką

Czujnik umieszczony w środku cewki, znajdującej się w połowie długości wzbudnika umożliwia kontrolowanie temperatury uzwojeń w czasie pracy silnika. Jarzmo wzbudnika zostało pocięte techniką laserową na krótkie odcinki o długości odpowiadającej uśrednionej szerokości żłobka silnika transformatorowego w celu otrzymania obu wzbudników o identycznych całkowitych długościach. Następnie wykonane zostało technologiczne przecięcie krążków zapobiegające powstawaniu prądów wirowych i umożliwiające wyprowadzenie końców uzwojeń. Każdy krążek pokryty również izolacyjną warstwą wspomnianego wcześniej lakieru. Gotowy pierścień widoczny jest na rysunku 2.

Oba zakończenia wzbudnika stanowiły kilkunastomilimetrowej grubości płyty tekstolitowe, które zapewniały stabilność konstrukcji. Odpowiednie wycięcia umożliwiły umieszczenie wzdłuż długości bieźni stalowych prętów ściskających, nadając jej ostateczną formę. Większe wycięcia w centralnych częściach obu płyt stanowiły posadowienia dla kolistych ślizgów teflonowych, w których następnie umieszczono dwuwarstwowy bieźnik. Uchwyt służący do mocowania ramienia siłomierza otrzymano z odpowiednio wytoczonego aluminiowego walca. Przy pomocy śruby gwarantującej wytrzymałość połączenia na występujące siły tnące oraz kleju epoksydowego zapewniającego szczelność złącza, został on scalony z konstrukcją twornika. System chłodzenia cieczą opierał się na koncepcji umieszczenia wlotu oraz wylotu płynu z tej samej strony twornika (rys. 3, rys. 4). W tym celu wytoczono w aluminiowym walcu nasadę posiadającą dwa otwory umożliwiające zamocowanie króćców dla węży doprowadzającego i odprowadzającego medium chłodzące.



Rys. 3. Końcówka do podłączenia obiegu cieczy chłodzącej

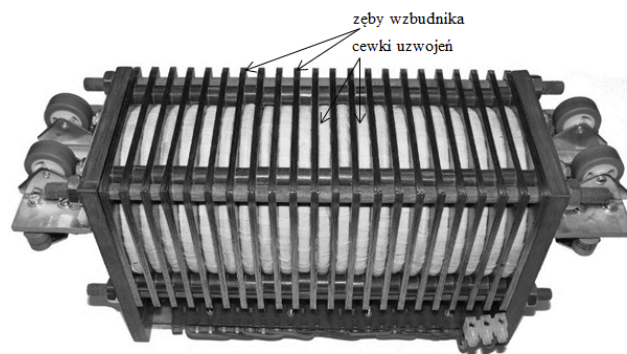


Rys. 4. Poglądowy przekrój wzdłużny systemu chłodzenia we wnętrzu bieźnika. Ukazano kierunek obiegu płynu chłodzącego (nie zachowano skali)

Gwinty uszczelniono nicią hydrauliczną oraz klejem epoksydowym. Nasadę połączono od wewnątrz z mosiężną rurką o małej średnicy i długości niewiele krótszej od twornika. Utrzymanie rurki mosiężnej w osi bieźnika umożliwiły dwie tekstolitowe podpory umieszczone na końcu oraz w środku długości hydraulicznego przewodu mosiężnego. Podpory zostały wykonane tak aby umożliwić przepływ chłodziwa.

## Zmiany konstrukcji silnika transformatorowego

Wykonany w ramach pracy inżynierskiej [1] silnik liniowy typu transformatorowego wymagał poprawy dotychczasowej konstrukcji. Konieczne okazało się całkowite rozebranie maszyny. Rysunek 5 przedstawia wzbudnik silnika transformatorowego po dokonaniu na nim opisanych czynności.

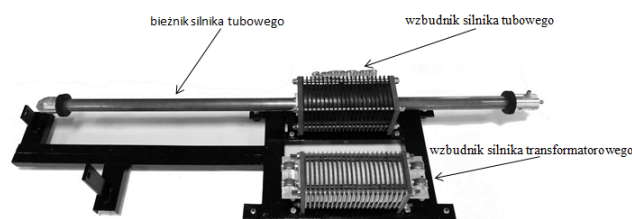


Rys. 5. Gotowy wzbudnik silnika transformatorowego

W celu zabezpieczenia przed pojawianiem się potencjału fazy na blachach wzbudnika cewki krążkowe owinięte to w całości taśmą batystową. Stosowane do zaciskania i utrzymywania stabilnej geometrii wzbudnika szpilki stalowe zostały usunięte. Nowe szpilki wykonane są ze starannie nagwintowanych prętów tekstolitowych. Nadmierne ściśnięcie wzbudnika nakrętkami umieszczonymi na szpilkach powodowało nierównomierne przysuwanie się do siebie poszczególnych żębów – centralne żęby pozostawały oddalone od siebie, podczas gdy skrajne ulegały zgniataniu. Ponadto blachy żębów ulegały pod wpływem przyłożonej siły znacznej deformacji. Te niekorzystne zjawiska udało się zniwelować stosując tekstolitowe przekładki w postaci krążków o długości odpowiadającej szerokości żłobka, umiejscowionych w szczelinach pomiędzy kolejnymi żębami w bezpośrednim sąsiedztwie prętów tekstolitowych. Zmodyfikowano zestawy jezdne umożliwiające ruch bieźnika. Każdy wózek składał się z dwóch kół naprowadzających oraz dwóch kół nośnych. Konfiguracja ta nie została zmieniona, jednak wymieniono obie pary kół nośnych. Nowe koła mają większe średnice, a powierzchnia styku obręczy z bieźnikiem pokryta jest materiałem gumowym zapewniającym przyczepność.

## Wykonanie stanowiska badawczego silnika liniowego transformatorowego i tubowego

Celem przeprowadzenia badań porównawczych silnika tubowego oraz transformatorowego wykonano stanowisko umożliwiające solidne mocowanie obu maszyn do stelaża wyposażonego w ramie wysięgnikowe pozwalające na zamontowanie siłomierza (rys. 6).



Rys. 6. Oba silniki zamontowane na ramie stanowiska (silnik transformatorowy ze zdjętym twornikiem)

W pierwszej kolejności konstrukcje obu silników wyposażono w stalowe łapy zbudowane z kilkumilimetrowej grubości kątowników. Łapy przytwierdzono z jednej strony do płyt tekstolitowych stanowiących zakończenia wzбудników, zaś z drugiej do spawanej pod wymiar stalowej ramy złożonej z kątowników i ceowników oraz posadowionej na tłumiących drgania gumowych podkładach. Ramę zaprojektowano tak, aby oba silniki mogły być do niej jednocześnie przymocowane, a ruchy liniowe tworników pozostały do siebie równoległe. Ramię wysięgnika umożliwiające unieruchomienie tworników poprzez mocowanie do siłomierza wyprowadzono z jednego z boków stelaża i poprowadzono równoległe do kierunku ruchu silników w linii środkowej pomiędzy obiema maszynami.

Długość ramienia została zaprojektowana tak, aby zablokowanie bieźników za pomocą siłomierza dokonywało się w momencie symetrycznego położenia bieźników względem wzbudników. Jest to konieczne ze względu na występowanie w silniku tubowym niewielkiej różnicy pomiędzy średnicą wewnętrzną teflonowego ślizgu, a średnicą zewnętrzną rury miedzianej. Gdyby różnica ta była mniejsza, mogłoby to skutkować zakleszczaniem części wtórnej podczas wykonywania ruchu, a więc podczas przepływu prądów wirowych powodujących rozszerzenie cieplne miedzi. Wspomniana różnica pomiędzy danymi średnicami powoduje niewielką zmianę kierunku ruchu bieźnika związaną z wysunięciem jego środka ciężkości poza kręgi teflonowe będące z mechanicznego punktu widzenia podporami przesuwными. Zmienia się więc rozmiar szczeliny powietrznej wzdłuż długości wzbudnika. Kształt silnika transformatorowego również wymusza zachowanie symetrii położenia zahamowanego twornika, ponieważ w innym razie, jego przechylenie powodowałoby znaczne zwiększenie szczeliny magnetycznej i zmianę generowanej siły ciągu. Po drugiej stronie stelaża umieszczono wspornik, do którego przytwierdzono pompę służącą tłoczeniu cieczy chłodzącej, zbiornik wyrównawczy płynu oraz chłodnicę (rys. 7).



Rys. 7. Widok układu chłodzenia na gotowym stanowisku pomiarowym

System chłodzenia połączono węzami gumowymi, o długościach dobranych w taki sposób, aby umożliwiły one pełen zakres ruchu bieźnika silnika tubowego. Ciecz chłodząca umieszczona w zbiorniku wyrównawczym położonym nad pompą, trafia do pompy, a ta, podłączona do źródła napięcia włącza płyn do króćca wkręconego w nasadę twornika. W dalszej kolejności chłodziwo

przedostaje się przez mosiężną rurkę do wnętrza części wtórnej i omywając ścianę, rury stalowej odbiera od niej ciepło. Ujście płynu stanowi drugie złącze umieszczone w nasadzie, dzięki któremu płyn dociera do chłodnicy, zaopatrzonej w wentylator. Schłodzona ciecz napędza zbiornik wyrównawczy zamykając obieg. Na otwór wylotowy wiatraka założono elastyczny przewód wentylatorowy, ukształtowany w taki sposób, aby wymusić ruch powietrza nad powierzchnią wzbudnika.

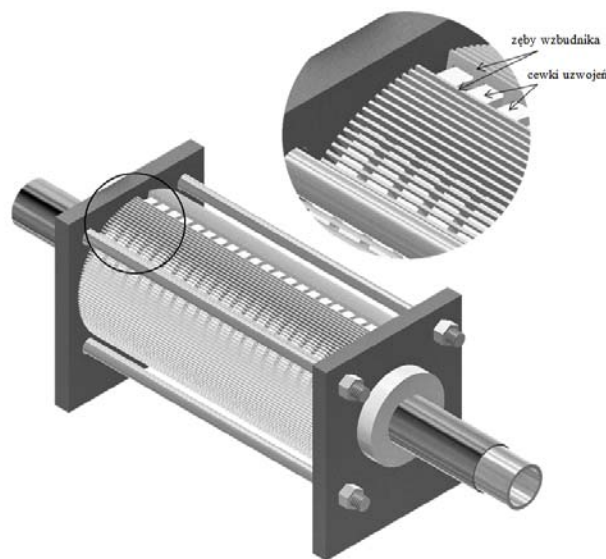
### Alternatywna konstrukcja silnika liniowego typu tubowego

Istnieje możliwość lepszego ukształtowania rdzenia wzbudnika silnika liniowego typu tubowego.



Rys. 8. Wygląd blachy grzebieniowej

Rdzeń złożony jest z blach grzebieniowych (rys. 8) ułożonych końcem zębów prostopadle do stycznej poprowadzonej do danego miejsca okręgu wykreślonego przez część zewnętrzną bieźnika. Całość konstrukcji przedstawiona jest na rysunku 9. Przedstawiona na rysunku 10 płyta tekstolitowa ma wycięcia umożliwiające zablokowanie poszczególnych blach grzebieniowych co pozwala na pewne utrzymanie konstrukcji rdzenia.

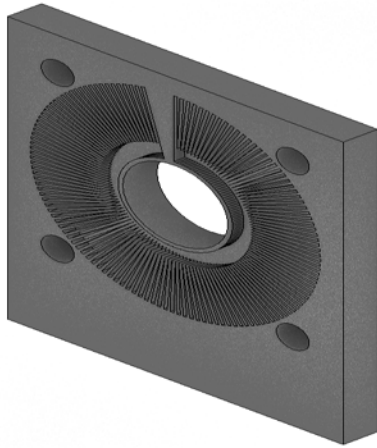


Rys. 9. Wygląd silnika z zastosowaniem blach grzebieniowych

Zastosowanie tego typu konstrukcji pozwala zmniejszyć straty w rdzeniu oraz zmniejszyć objętość wykorzystanego materiału na rdzeń wzbudnika. Pozostawiona przerwa między blachami rdzenia wzbudnika jest konieczna w celu umożliwienia wyprowadzenia początków i końców cewek uzwojeń.

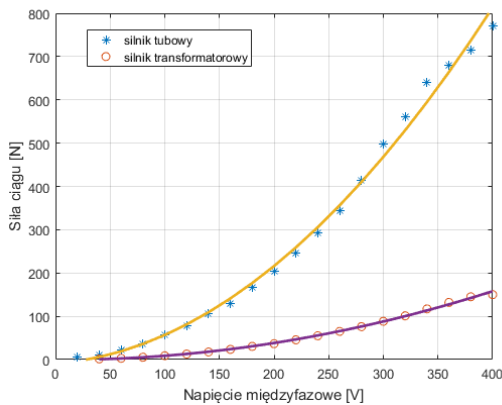
### Badania silników liniowych typu tubowego i transformatorowego

Rzeczywiste modele silników liniowych zostały poddane szeregowi badań celem wyznaczenia parametrów eksploatacyjnych oraz co istotniejsze, porównaniu obu struktur pod względem osiągnięć, głównie siły ciągu. Wszelkie badania przeprowadzono na silnikach zatrzymanych w wyniku połączenia ich tworników wspornikami ramion wysięgnika za pośrednictwem siłomierza.

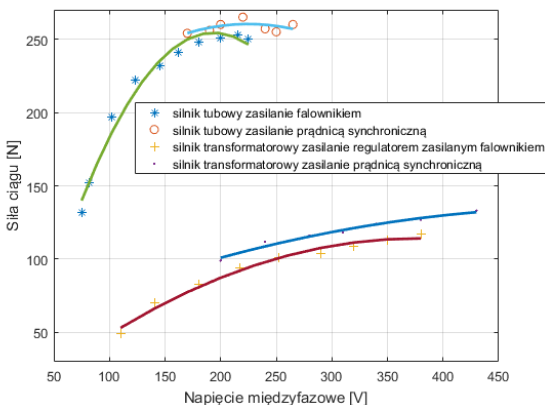


Rys. 10. Wygląd płyty tekstolitowej utrzymującej rdzeń

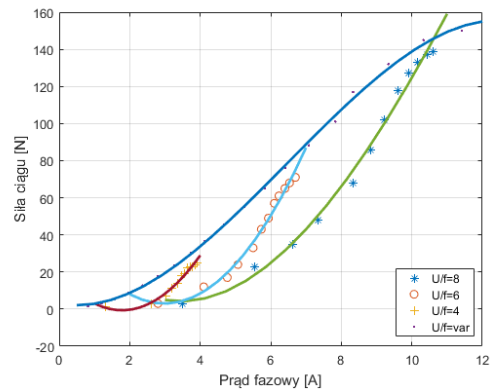
Wentylator, który generował strumień powietrza kierowany na wzbudnik odpowiednio silnika tubowego lub transformatorowego pozostawał włączony. W przypadku prób wykonywanych na silniku tubowym dodatkowo uruchamiano pracę pompy tłoczącej płyn chłodniczy. Zbudowane silniki liniowe poddano badaniom takim jak: próby nagrzewania, zasilanie z regulatora indukcyjnego, z falownika, z prądnicy synchronicznej i z regulatora indukcyjnego zasilanego falownikiem. Dodatkowo przeprowadzono badanie rezystancji i reaktancji zwarcia uzwojenia wzbudnika oraz badanie indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej silnika transformatorowego. Wyniki otrzymanych badań przedstawiono na rysunkach 11 - 13.



Rys. 11. Zależność siły ciągu w funkcji napięcia międzyfazowego parametryzowana typem silnika przy zasilaniu z regulatora indukcyjnego



Rys. 12. Zależność siły ciągu w funkcji napięcia międzyfazowego parametryzowana typem silnika i rodzajem źródła zasilania



Rys. 13. Zależność siły ciągu w funkcji prądu fazowego dla silnika transformatorowego przy zasilaniu z falownika, parametryzowana stosunkiem napięcia do częstotliwości oraz przy zasilaniu silnika z regulatora indukcyjnego

Wyniki badań wyraźnie wskazują lepsze parametry eksploatacyjne silnika tubowego pod względem generowania siły ciągu. Jest to spowodowane tym, że silnik tubowy pomimo pozornego podobieństwa objętościowego do silnika transformatorowego posiada zamknięty obwód magnetyczny. Dzięki temu w silniku nie występują negatywne zjawiska takie jak występowanie nie zrównoważonej siły naciągu. Jednocześnie wykazano, że jakość napięcia zasilającego wpływa, choć nie w sposób bardzo znaczący, na wartość uzyskanej siły. Badane silniki przy zasilaniu z falownika charakteryzowały się niższymi wartościami siły ciągu dla tych samych wartości napięć zasilających w porównaniu do zasilania prądnicą synchroniczną.

**Autorzy:** Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński, e-mail: gkamiński@ime.pw.edu.pl, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Warszawska, 00-660 Warszawa Pl. Politechniki 1, mgr inż. Łukasz Ordyszewski, e-mail: lukasz.ordyszewski@ee.pw.edu.pl, mgr inż. Karol Ciesielski, email: karolc3a@gmail.com

#### LITERATURA

- 1 Ciesielski K., Ordyszewski Ł.: Praca dyplomowa inżynierska pt. Konstrukcja silnika liniowego do napędu bramy, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Warszawa 2017.
- 2 Kamiński G., Przyborowski W., Staszewski P., Kupiec E.: Rozdział 6. Silniki elektryczne liniowe w napędach PRT, 6.1, Szczypior J., Biernat A., Jakubowski R.: Badania maszyny elektrycznej Ekomobilność, Tom I, Innowacyjne i ekologiczne środki transportu, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2015.
- 3 Gieras J.: Silniki indukcyjne liniowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1990
- 4 Boldea I.: Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook, CRC Press, New York 2013