

Zbigniew Goryca, Politechnika Radomska, Radom  
Krzysztof Kolano, Politechnika Lubelska, Lublin

## BEZPRZEKŁADNIOWY NAPĘD DRZWI WINDY

### GEARLESS DRIVER FOR LIFT DOOR

**Abstract:** The paper presents calculation and construction of gearless driver for lift door. Driver consists of DC brushless motor and electronic controlling circuit. Basic constructing assumptions were low turning velocity, high nominal and starting torque and low cogging torque. Motor control was realized by microcontroller MB91F267 fitted with u-DSP core. Working conditions required the application of algorithms of speed feedback with assumed trajectory of door movement. Cost reduction forced the authors to give up the module of continuous measurement of speed and utilize existing rotor's position sensors. The paper presents also images of the motor, controlling electronic circuit and the whole system mounted in lift door. Presented solution was successfully tested in real object.

#### 1. Wstęp

Napęd drzwi windy pracuje praktycznie ciągle w stanie nieustalonym, gdyż przy każdym otwieraniu i zamykaniu dokonywany jest rozruch i hamowanie silnika. Dlatego też silnik przeznaczony do tego rodzaju pracy powinien być dobrany niezwykle starannie. W dotychczas stosowanych rozwiązaniach stosuje się asynchroniczne silniki klatkowe współpracujące z przekładnią pasową lub planetarną przekładnią zębatą. Rozwiązania takie zawierają znaczną liczbę elementów przez co podatne są na wystąpienie uszkodzeń, zaś w przypadku silnika asynchronicznego zalecane są układy ograniczające prąd rozruchu. Dlatego też wszelkie prace związane z nowymi napędami przeznaczonymi do drzwi wind mają duże szanse na wdrożenie w znacznej liczbie egzemplarzy. Poniżej przedstawiamy nowe rozwiązanie, które zostało przetestowane w warunkach laboratoryjnych. Wyniki uzyskane w trakcie badań wskazują, że jest to rozwiązanie znacznie lepsze pod względem technicznym i eksploatacyjnym.

#### 2. Konstrukcja napędu

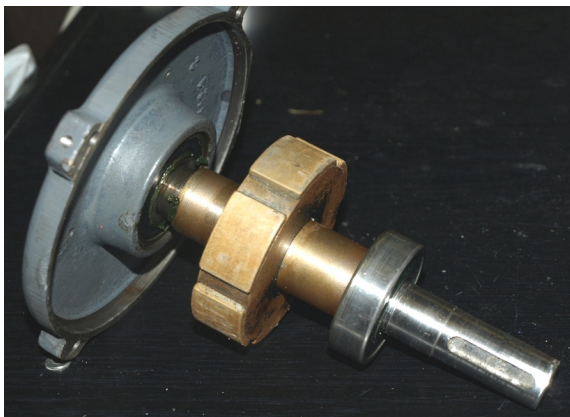
Opracowany napęd drzwi windy składa się z bezszczotkowego silnika prądu stałego, układu sterującego pracą silnika oraz z zębatego paska przenoszącego ruch na drzwi windy.

##### 2.1. Konstrukcja silnika

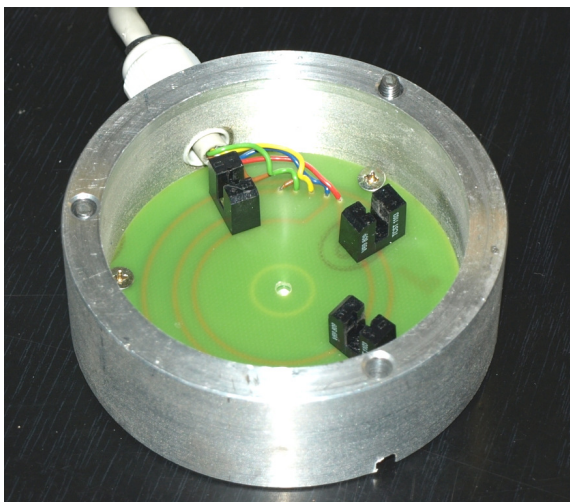
Wybór rodzaju silnika związany był z licznymi zaletami silników bezszczotkowych – cichą pracą, wysoką sprawnością, małą masą i dużą trwałością ograniczoną praktycznie trwałością łożysk. Niebagatelne znaczenie miał również

fakt, że rozruch tego typu silnika przeprowadzany jest metodą PWM i prądy rozruchu są w tym przypadku małe w porównaniu do prądów rozruchu silników asynchronicznych. Przy projektowaniu silnika założono niską prędkość obrotową 500 obr./min. co pozwala wyeliminować przekładnię i nieznacznie zmniejszyć koszt napędu przy jednoczesnym zwiększeniu jego niezawodności. Z uwagi na wyeliminowanie przekładni przy zachowaniu stałej mocy silnika 150 W musi ulec zmianie (zwiększeniu) moment znamionowy silnika, a zatem jego wymiary i masa. W założeniach przyjęto także niskie, bezpieczne napięcie zasilania na poziomie 24 V. Z uwagi na konieczność minimalizacji kosztów przy konstruowaniu silnika wykorzystano wiele elementów istniejącej maszyny: obudowy, łożysk oraz pakietu blach stojana typowego małego silnika asynchronicznego. Z katalogu dobrano blachy stojana z 36-ma żłobkami. Założono także rodzaj - N33SH i parametry neodymowego magnesu  $B_r=1,15T$  oraz  $H_c=944$  kA/m. W celu obliczenia grubości magnesu zapewniającej brak nasycenia obwodu magnetycznego przeprowadzono obliczenia indukcji metodą elementów skończonych [6], we wszystkich fragmentach obwodu magnetycznego. Bardzo ważnym parametrem silnika jest mały moment zaczepowy pozwalający na otwarcie drzwi windy przy braku zasilania. W procesie obliczeń połowych [7] minimalizowano ten moment przez odpowiednie dobranie rozpiętości katowej pojedynczego bieguna wirnika. Wartość indukcji w szczelinie silnika, prędkość obrotowa, moc i napięcie zasilania były podstawą do obliczenia parametrów

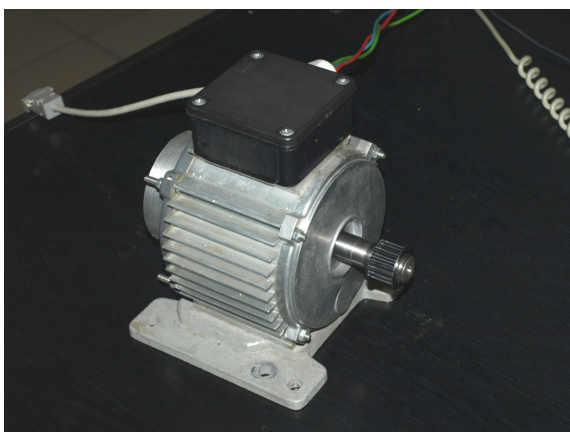
uzwojenia [1], [6]. Na podstawie wyników obliczeń wykonano prototyp silnika przedstawiony na zdjęciach nr 1, 2, i 3. Zdjęcia te przedstawiają wirnik silnika, zespół czujników położenia wirnika względem stojana niezbędny do poprawnej pracy napędu oraz kompletny silnik.



Zdjęcie nr 1. Wirnik z naklejonymi magnesami

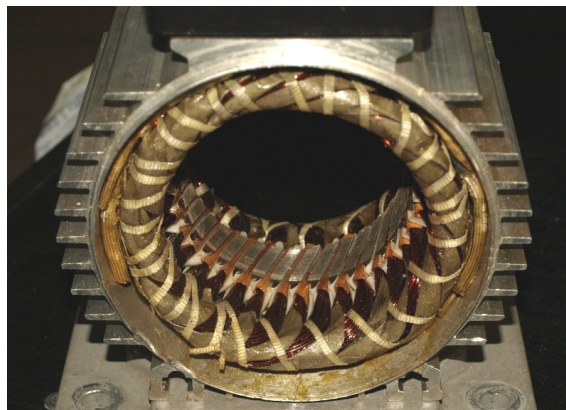


Zdjęcie nr 2. Zespół czujników położenia wirnika względem stojana



Zdjęcie nr 3. Widok prototypu silnika

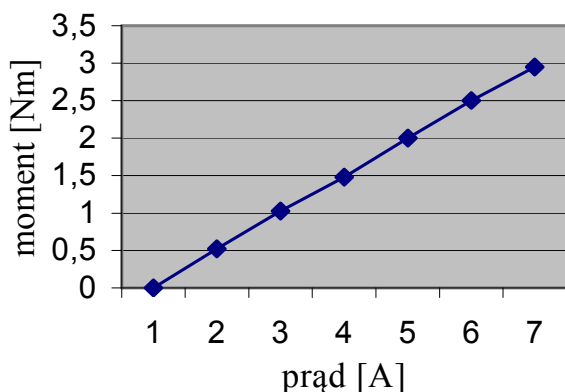
Jak widać na zdjęcie nr 1 prądnica jest maszyną sześciobiegunową. Moment zaczepowy maszyny z magnesami trwałymi zależy od wartości indukcji w szczelinie, rozpiętości kątowej pojedynczego magnesu i liczby biegunów [2], [3], [4]. Przy zwiększaniu liczby biegunów moment zaczepowy wzrasta. Najczęściej stosowanym sposobem zmniejszenia momentu zaczepowego jest pakietowanie blach stojana ze skosem o jedną podziałkę żłobkową [3], [5]. Pociąga to za sobą wzrost kosztów związany z wykonaniem przyrządu do takiego pakietowania, a także zmniejszenie użytecznej powierzchni żłobka. W przypadkach, gdy pakiet stojana jest krótki, zmniejszenie powierzchni żłobka jest wyraźne i występują kłopoty z uzwojeniem maszyny. W przedstawionej konstrukcji, w celu zmniejszenia tego momentu zastosowano dwa sposoby minimalizacji momentu zaczepowego – dobór rozpiętości kątowej magnesy i skos żłobków o jedną podziałkę żłobkową. Takie rozwiązanie pozwoliło uzyskać niezwykle mały moment zaczepowy na poziomie 60 mNm co stanowi około 2,1% momentu znamionowego silnika. Na zdjęciu nr 4 pokazano uzwojony pakiet stojana z widocznym skosem żłobków.



Zdjęcie nr 4. Uzwojony pakiet stojana

### 3. Badania laboratoryjne silnika

Badania silnika obejmowały pomiary parametrów biegu jałowego i pomiar momentu wytwarzanego przez silnik w stanie zahamowanym oraz wspomniany wcześniej pomiar wartości maksymalnej momentu zaczepowego. Przy zasilaniu napięciem 24 V silnik rozwija przy biegu jałowym prędkość 540 obr./min. i pobiera prąd o wartości 230 mA. Pomiary momentu w funkcji prądu w stanie zahamowanym przedstawione są na rys. 1.

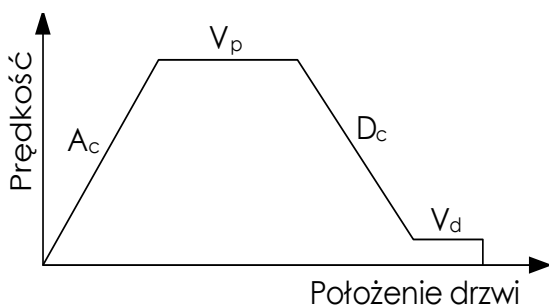


Rys. 1. Moment wytwarzany przez silnik w funkcji prądu

Maksymalną wartość momentu zaczepowego zmierzono przy użyciu dźwigni i precyzyjnej wagi. Jak wspomniano wcześniej wartość tego momentu wynosi 60 mNm.

#### 4. Wymagania stawiane układowi napędowemu drzwi kabinowych

Podstawowym zadaniem układu sterowania napędu drzwi kabinowych jest realizowanie zadanej przez obsługę krzywej jazdy drzwi. Krzywą jazdy drzwi przedstawia rys 2.



Rys. 2. Krzywa jazdy drzwi kabinowych

Można zauważyć, że krzywa ta jest analogiczna do krzywej jazdy samego dźwigu osobowego, w której wyróżniamy dwie prędkości: prędkość przejazdową „ $V_p$ ” i prędkość dojazdową „ $V_d$ ”. Podstawową różnicą jest to, że wymagania stawiane napędowi głównemu dźwigu są takie same dla obu kierunków jazdy, natomiast w przypadku napędu drzwi kabinowych konieczne jest ograniczenie prędkości zamykania drzwi tak, aby ewentualna kolizja z pasażerem nie spowodowała u niego obrażeń. Dodatkowo konieczne jest sparametryzowanie przyspieszenia „ $A_c$ ” i opóźnienia „ $D_c$ ” drzwi tak, aby zapewnić odpowiednią dynamikę rozpędzania i hamowania. Ze względu na konieczność zapewnienia dość szybkiego otwarcia/zamknięcia drzwi, a jednocześnie ograniczenia hałasu wynikającego

z uderzeń drzwi w ograniczniki przy dużej prędkości konieczne jest zachowanie dość dużego stosunku wartości prędkości przejazdowej do prędkości dojazdowej równego od około 5:1 do 10:1. Chwilowa prędkość skrzydeł jest uzależniona od wielu czynników, z których wiele jest niezmiennych podczas całego okresu eksploatacji drzwi, jak również wielu czynników, które z czasem ulegają znacznym zmianom. Do tych drugich możemy zaliczyć przede wszystkim:

- zmianę sił tarcia uzależnioną od jakości konserwacji, jak również zużycia rolek i prowadnic drzwi,
- specyficzne warunki pracy każdych drzwi szybowych powodujące rozbieżności pomiędzy momentem mechanicznym jaki musi wytwarzać układ napędowy na każdym przystanku,
- nacisk jaki wywierają pasażerowie na skrzydła drzwi podczas ich otwierania/zamykania.

Wymagania techniczne stawiane przez użytkowników układowi napędowemu drzwi kabinowych:

- zapewnienie realizacji zadanej krzywej jazdy drzwi,
- zapewnienie szerokiego zakresu regulacji prędkości obrotowej,
- zapewnienie możliwości ograniczenia sił działających na pasażera w przypadku wystąpienia kontaktu: pasażer-ruchoma płaszczyzna drzwi,
- wytworzenie momentu dociskowego przy skrajnych położeniach skrzydeł drzwi,
- możliwość pracy z minimalnym zapotrzebowaniem na energię w czasie braku zasilania - zasilanie z akumulatorów,
- dokładna kontrola położenia drzwi,
- konieczność ograniczenia kosztów całego układu napędowego przy zachowaniu wysokiej dynamiki i stopnia zaawansowania konstrukcji,
- możliwie niska ilość zużywanej energii.

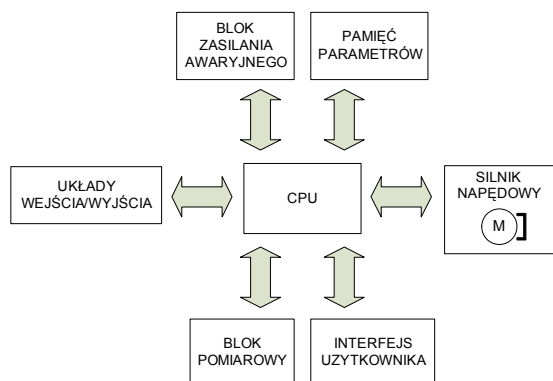
#### 5. Wymagania stawiane mikroprocesorowemu sterownikowi układu napędowego drzwi kabinowych

Specyfika pracy urządzenia wymaga wykorzystania układu sterującego, przy pomocy którego można zrealizować algorytm prędkościowego sprzężenia zwrotnego. Do wymagań stawianych układowi nadzorującemu pracę napędu należą:

- uniwersalność - moduł sterujący musi być wyposażony w zestaw wejść/wyjść umożli-

- wiający współpracę z wejściami dyskretnymi różnych systemów sterujących pracą dźwigu osobowego,
- prosty i przejrzysty interfejs użytkownika pozwalający na wielopłaszczyznowy dostęp do ustawień urządzenia,
  - możliwie małe wymiary umożliwiające umieszczenie urządzenia w ościeżnicy drzwi kabinowych,
  - wyposażenie sterownika w system transmisji szeregowej CAN umożliwiającej współpracę z najnowszymi sterownikami dźwigów osobowych,
  - umożliwienie zdalnego dostępu do parametrów (bez konieczności zatrzymywania pracy dźwigu),
  - rozbudowana funkcja autodiagnostyki pracy urządzenia w celu zwiększenia bezawaryjności i zminimalizowania czynności obsługowych,
  - kontrola podstawowych wielkości elektrycznych – prądu silnika, napięcia zasilania.

Dość wysokie wymagania stawiane sterownikowi oraz konieczność ograniczenia kosztów całego układu napędowego sprawiły, że do budowy sterownika wykorzystany został mikrokontroler jednocukłowy firmy Fujitsu. Pomimo małych gabarytów i korzystnej ceny jest to układ, którego parametry pozwalają na syntezę układów napędowych z wykorzystaniem rozbudowanego członu matematycznego opartego o architekturę  $\mu$ -DSP. Mikrokontroler MB91F267 integruje w swej strukturze wszystkie elementy potrzebne do sterowania układem napędowym – moduły odpowiedzialne za modulację PWM, szybkie przetworniki A/C, szybkie układy zliczania impulsów reagujące na zmiany stanów czujników położenia wirnika silnika BLDC (rys.3).



Rys. 3. Schemat blokowy mikroprocesorowego sterownika układu napędowego drzwi kabinowych z silnikiem BLDC

Konieczność ograniczenia kosztów sprawiła, że do pomiaru prędkości rzeczywistej wirnika, a co za tym idzie do obliczania położenia drzwi wykorzystane zostały czujniki optoelektroniczne umieszczone w obudowie silnika, a służące do kontrolowania procesów komutacyjnych. Rozwiązanie takie znacząco obniżyło koszt całego urządzenia poprzez umożliwienie rezygnacji z dodatkowego członu pomiaru prędkości. Prototyp sterownika mikroprocesorowego został wykonany i przetestowany w firmie Lift-Service S.A. w Lublinie.

## 6. Wnioski

Podczas prac wdrożeniowych nowego bezprzekładniowego układu napędowego drzwi kabinowych stwierdzono, że przy zachowaniu podstawowych walorów eksploatacyjnych napędu z silnikiem indukcyjnym (możliwość wpływania na podstawowe parametry pracy drzwi kabinowych) uzyskano znaczne ograniczenie zużycia energii elektrycznej. Na szczególną uwagę zasługuje fakt zmniejszenia ilości zużywanej energii podczas postoju drzwi zarówno otwartych (siła docisku drzwi ma wtedy znaczną wartość), jak również gdy drzwi są zamknięte. W dotychczas stosowanym układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym obserwowano znaczny wzrost temperatury silnika zwłaszcza podczas postoju drzwi i wytwarzania momentu dociskowego, co często prowadziło do jego termicznego uszkodzenia. W przypadku prezentowanego silnika temperatura obudowy wzrastała zaledwie o kilka stopni. Zalety układu napędowego z silnikiem BLDC sprawiają, że wydaje się on być bardzo dobrą alternatywą dla powszechnie stosowanych układów napędowych z silnikiem indukcyjnym zwłaszcza, że niewielka różnica kosztów początkowych inwestycji, przemawiająca na korzyść układów napędowych starszego typu zwraca się w przeciągu około 2 lat pracy urządzenia w postaci zmniejszonych kosztów eksploatacyjnych.

## 7. Literatura

- [1]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2]. Łukaniszyn M., Młot A.: *Analiza momentu elektromagnetycznego i składowych pulsacji w bezszczotkowym silniku prądu stałego wzbudzonym magnesami trwałymi*. „Przegląd Elektrotechniczny” nr 10, 2005.
- [3]. Gajewski M.: *Analiza pulsacji momentu w silnikach bezszczotkowych z magnesami trwałymi*.

Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, 2007.

[4]. 4. Goryca Z.: *Niskonapięciowy, wolnoobrotowy napęd z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, XV Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ustroń 17-19 maj, 2006.

[5]. 5. Goryca Z., Bernatt J.: *Elektryczny, niskonapięciowy układ napędowy łodzi*, XV Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ryto 23-25 maj, 2007.

[6]. 6. Goryca Z., Szczypior J.: *Napęd skutera elektrycznego bezszczotkowym silnikiem z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi*, Sixth International Conference: Drives and Supply Systems for Modern Electric Traction in Integrated XXI<sup>st</sup> Century Europe, Pułtusk, September 27-22 2003.

[7]. 7. COMSOL Multiphysics wersja 3.3 licencja nr 1027828

### **Autorzy**

dr hab. inż. Zbigniew Goryca prof. P.R. – Instytut Automatyki i Telematyki, Wydział Transportu i Elektrotechniki, Politechnika Radomska, e-mail: [tgoryca@kki.net.pl](mailto:tgoryca@kki.net.pl), [z.goryca@pr.radom.pl](mailto:z.goryca@pr.radom.pl), tel.: 601-25-05-30

dr inż. Krzysztof Kolano – Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Politechnika Lubelska, e-mail: [krzysiekkolano@wp.pl](mailto:krzysiekkolano@wp.pl)