

**Krzysztof Kolano**  
Politechnika Lubelska, Lublin

## **PROBLEMY STEROWANIA BEZREDUKTOROWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO DRZWI KABINOWYCH DŹWIGU OSOBOWEGO Z SILNIKIEM BLDC**

### **TECHNICAL ASPECTS OF CONTROLLING LIFT CAR DOORS WITH GEARLESS PM BLDC DRIVE**

**Abstract:** The basic structure of modern drive of lift car doors consists of a permanent magnet DC motor and one-stage planetary gearbox. To reduce the maintenance to the minimum permanent magnet DC motors are often replaced by PM BLDC motors. Although this structure is much more sophisticated it still needs planetary gearbox to reduce rotary speed. In small drive systems (less than 500 Watts) one-stage planetary gearbox has mechanical efficiency less than 70 %, so that it affects negatively on energy consumption of the whole drive system. To reduce main disadvantages of most popular drive systems widely used in lift car doors, the new drive structure based on slow speed gearless BLDC motor has been presented. In this paper basic problems with speed control feedback have been described. To simplify the drive structure rotary encoder was eliminated from the motor speed feedback and replaced by the rotor position signals and special routine, that calculates the actual speed as a function of the rotation time.

#### **1. Wprowadzenie**

Współczesne układy napędowe dźwigów osobowych są bardzo zaawansowanymi urządzeniami o dużej sprawności i z szerokim zakresem regulacji. Rewolucja, jaka dokonała się w ciągu ostatnich kilku lat niemal całkowicie wyparła klasyczne układy napędowe dźwigów osobowych z indukcyjnym silnikiem dwubiegowym. Prawie wszystkie nowe inwestycje realizowane są przy wykorzystaniu synchronicznych silników bezreduktorowych jako napędu głównego dźwigu. Możliwość zrezygnowania z przekładni mechanicznej w układzie napędu regulowanego sprawia, że urządzenie jest niemal bezobsługowe, a jego sprawność i dynamika znacząco wyższa od dotychczas stosowanych rozwiązań. Znacznie wyższe koszty inwestycji mają zwrócić się w ciągu kilku lat eksploatacji dźwigu poprzez obniżenie rachunków za energię elektryczną i czynności obsługowe. W rzeczywistości czas zwrotu inwestycji jest silnie uzależniony od intensywności eksploatacji urządzenia. W budynkach użyteczności publicznej liczba jazd dźwigu może sięgać nawet miliona jazd na rok, podczas, gdy w budynkach mieszkalnych wynosi ona zaledwie kilkadziesiąt tysięcy. Różnica ta sprawia, że koszty eksploatacji urządzenia dźwigowego są przy mniejszej liczbie jazd generowane głównie przez urządzenia działające niezależnie od napędu głównego.

Należą do nich:

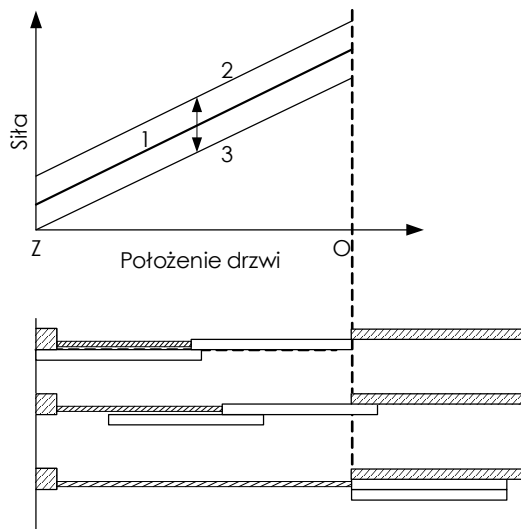
- oświetlenie dźwigu,
- potrzeby własne układu sterowania,
- potrzeby własne układu napędu głównego,
- układy wentylacji kabiny,
- układ napędowy drzwi kabinowych.

Główne siły inżynierów skupiają się ostatnio właśnie na ograniczeniu tzw.: potrzeb własnych urządzeń sterujących oraz poboru energii przez oświetlenie.

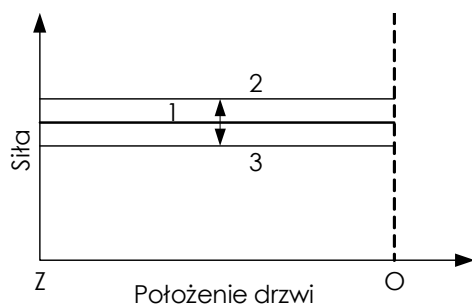
Stosunkowo niewiele uwagi przywiązuje się do układów napędowych drzwi osobowych, które pomimo niewielkiej mocy ze względu na specyfikę swej pracy pobierają energię przez cały czas pracy dźwigu.

#### **2. Wymagania techniczne**

Konieczność spełnienia rygorystycznych norm bezpieczeństwa korzystania z urządzeń dźwigowych silnie wpływa na sposób konstruowania układów napędowych w nich wykorzystywanych. Wymagania precyzują, aby napęd główny był na stałe połączony z luzownikiem, a drzwi kabinowe w przypadku braku zasilania mają niezwłocznie się zamknąć. Konstruktorzy opracowali system mechaniczny, który przy wykorzystaniu sprężyny (rys 1), bądź wymiennicę – ciężarka i systemu bloczków (rys 2) zamykają drzwi w przypadku zaniku napięcia zasilania.



Rys. 1. Siła wywierana przez sprężynę zwrotną w zależności od położenia drzwi i naciągu wstępnego



Rys. 2. Siła wywierana przez ciężarek

Niestety to rozwiązanie powoduje konieczność przewymiarowania urządzenia napędowego tak, aby zapewnić odpowiednie poziomy przyspieszeń drzwi, jak również pokonanie sił oporu pochodzących od sprężyny zwrotnej lub ciężarka.

Wszystkie elementy odpowiedzialne za zamknięcie drzwi w stanie beznapięciowym są zainstalowane bezpośrednio na drzwiach szybowych każdego piętra i podlegają indywidualnej korekcji ustawień, stąd na rysunkach nr 1 i 2 zaznaczono ustawienie optymalne „1” jak również ustawienia skrajne „2” oraz „3”.

### 3. Założenia techniczne

Od kilku lat zauważalna jest tendencja do opracowywania energooszczędnych układów napędowych drzwi kabinowych z wykorzystaniem silników z magnesami trwałymi. Z uwagi na wysoki koszt enkoderów położenia absolutnego, który miałby znaczny udział w cenie całego napędu drzwi, stosowane są szybkoobrotowe silniki BLDC sprzężone z przekładnią

mechaniczną. Przekładnia ta jest niezbędna do zredukowania obrotów silników BLDC (wynosząc one od 3000 do 6000 obr/min) do wartości umożliwiającej wykorzystanie do napędu skrzydeł (około 500 obr/min). Wysoka dynamika tych silników jest szczególnie pożądana w przypadku wejścia pasażera w światło drzwi podczas zamykania. Silnik BLDC jest w stanie, w odróżnieniu od tradycyjnego silnika indukcyjnego, wykonać szybki nawrót ograniczając siłę działającą na pasażera.

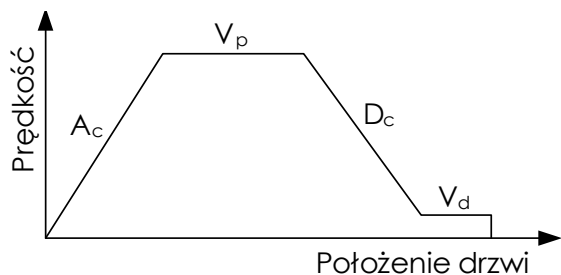
Niestety zastosowanie jednostopniowej przekładni planetarnej w silniku o mocy około 200W wpływa bardzo niekorzystnie na bilans energetyczny urządzenia. Tej wielkości przekładnie mają typowo sprawność około 60-70%, a ich opory własne wymuszają zastosowanie większej siły zamykającej drzwi w stanie beznapięciowym. Dodatkowo koszt tego typu przekładni jest porównywalny z kosztem silnika napędowego, co znacząco ogranicza rozwój tych urządzeń.

### 4. Projekt urządzenia

Chęć ograniczenia zużycia energii, jak również polepszenia dynamiki pracy drzwi kabinowych skłania do zastosowania analogicznie, jak w przypadku napędów głównych dźwigu, silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z enkoderem położenia absolutnego. Niestety takie rozwiązanie choć spełnia wszystkie założenia techniczne, byłoby bardzo kosztowne. Wykorzystanie „resolvera” umożliwiłoby zastosowanie sterowania poprzez modulację wektora przestrzennego „SVM”, ale znacząco podniosłoby koszty całego układu napędowego.

Aby połączyć walory bezreduktorowych silników synchronicznych z prostotą sterowania silników BLDC zdecydowano się wykorzystać prototypowy wolnoobrotowy silnik BLDC skonstruowany przez Profesora Z. Gorycę [2]. Integralną częścią silnika napędowego prądu stałego z magnesami trwałymi jest układ czujników położenia wału. W silnikach BLDC standardowo stosowane są trzy czujniki położenia mogące określić 6 różnych stanów położenia wirnika. Na tej podstawie układ zarządzający dokonuje załączenia odpowiedniej pary tranzystorów w mostku sterującym.

Podstawowym zadaniem układu sterowania napędu drzwi kabinowych jest realizowanie zadanej przez obsługę krzywej jazdy drzwi. Krzywą jazdy drzwi przedstawia rys 3.



Rys. 3. Krzywa jazdy drzwi kabinowych

Wyraźnie można zauważyć, że krzywa ta jest analogiczna do krzywej jazdy samego dźwigu osobowego, w której wyróżniamy dwie prędkości: prędkość przejazdową „Vp” i prędkość dojazdową „Vd”. Podstawową różnicą jest to, że wymagania stawiane napędom głównym 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 „Ac” i opóźnienia „Dc” 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 „Vp/Vd” równego od około 5:1 do 10:1.

Moment oporowy na wale silnika jest wypadkową sumą momentu pochodzącego od oporów ruchu skrzydeł drzwi, jak również od sprężyny, bądź ciężarka dociskowego.

Chęć ograniczenia asortymentu magazynowego urządzeń skłoniła do opracowania jednego typu silnika napędowego, którego zapas mocy i momentu będzie w stanie wystarczyć do napędu drzwi o różnej masie i konstrukcji w szerokim zakresie nastaw dotyczących poziomów prędkości, jak również maksymalnych wartości przyspieszeń i opóźnień.

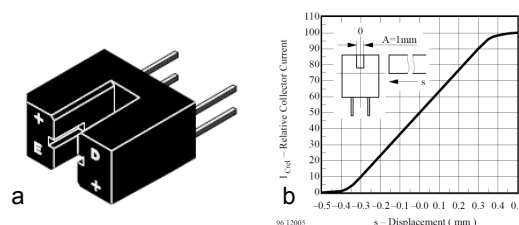
Podstawowym elementem układu napędowego jest sterownik silnika BLDC oparty o mikrokontroler jednocukłowy MB91F267 integrujący w swej strukturze wszystkie niezbędne do budowy sterownika bloki funkcyjne [3].

## 5. Pomiar prędkości silnika BLDC

Z uwagi na specyfikę pracy układu napędowego drzwi kabinowych – na każdym piętrze

warunki pracy mogą znacznie się od siebie różnić, konieczne jest wykorzystanie prędkościowego sprzężenia zwrotnego do stabilizacji prędkości i kontroli położenia drzwi kabinowych. Obecność elementów komutatora elektronicznego sprawia, że istnieje możliwość zrezygnowania z dodatkowych elementów pomiaru prędkości i wykorzystanie do pomiaru jego elementów.

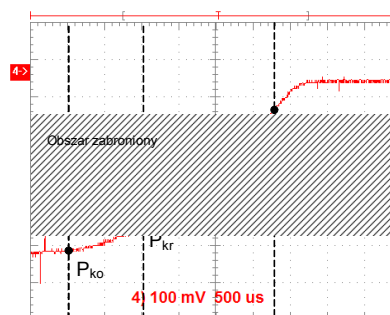
W prototypie silnika użyte zostały trzy optoelektroniczne czujniki złożone z pary dioda – fototranzystor – rys 4a. Ruchomy element sprzężony z wałem silnika w odpowiednich momentach przesłania szczelinę pomiędzy tymi elementami i zmienia prąd fototranzystora, co jest sygnałem dla komutatora elektronicznego rys 4b .



Rys. 4. Optoelektroniczny czujnik położenia wału silnika napędowego -a, oraz jego charakterystyka -b

Niestety podczas pracy z niską prędkością obrotową układ nie zachowywał się poprawnie. Zastosowanie mikrokontrolera specjalizowanego znacząco ułatwiło pracę nad sterownikiem, ale jego rozwiązania konstrukcyjne były zoptymalizowane do pracy układu z dużą prędkością przełączania komutatora, co owocowało doborem niewłaściwego wektora sterującego rys. 5.

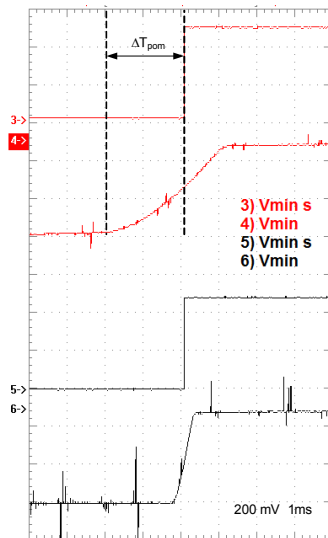
Algorytm pracy komutatora elektronicznego reagował na sygnał zmiany napięcia czujników optoelektronicznych w punkcie Pkr.



Rys. 5. Przebieg napięcia czujnika położenia wału napędowego podczas jego przełączenia

Niestety szybkość zmian prądu fototranzystora była na tyle niska, że wektor sterowania dobie-

rany był zbyt wcześnie. Efektem było utykanie silnika przy niskich wartościach prędkości obrotowej. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie przełączalnych buforów z wejściem reagującym na wzrost napięcia z czujnika lub zastosowanie czujników o węższej szczelinie i innej charakterystyce wyjściowej. Przebieg sygnałów dla różnych prędkości silnika przy zastosowaniu buforów pośredniczących przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Przebiegi sygnałów czujników położenia wału silnika napędowego

Podstawowym problemem jaki pojawił się podczas opracowywania algorytmu sterującego pracą komutatora elektronicznego był prawidłowy pomiar prędkości obrotowej wału silnika. Algorytmy stosowane w realizacji pętli sprzężenia zwrotnego szybkoobrotowych silników BLDC dokonują uśrednienia wartości mierzonej na podstawie minimum dwóch pomiarów. Powoduje to pogorszenie dynamiki regulacji, ale w przypadku prędkości obrotowych większych od 1000 obr/min jest to w wielu aplikacjach możliwe do zaakceptowania. W przypadku wykorzystania wolnoobrotowego silnika BLDC o znamionowej prędkości obrotowej równej 500 obr/min i zakresie regulacji od 10 do 120% jakiegokolwiek algorytmy uśredniające powodują drastyczne pogorszenie parametrów regulacji i dynamiki silnika.

Bardzo ważnym aspektem jest precyzyjne wykonanie elementów odpowiedzialnych za określenie położenia wału napędowego. Ewentualny błąd rozmieszczenia czujników wpłynie nie tylko na poprawność określenia prędkości obrotowej, ale również na pracę samego układu

napędowego (niedokładna komutacja). Również zastosowanie czujników optoelektrycznych o odpowiedniej charakterystyce pozwala na zmniejszenie czasu opóźnienia komutacji  $\Delta T_{pom}$  (rys. 6).

Zasadą pomiaru prędkości obrotowej wału silnika BLDC jest pomiar czasu jego obrotu pomiędzy dwoma punktami charakterystycznymi. Czas ten jest odwrotnie proporcjonalny do rzeczywistej prędkości obrotowej silnika.

Zmienny czas opóźnienia pomiaru prędkości sprawia, że nie powinno się stosować typowych kryteriów doboru regulatorów zakładających stałość czasu opóźnienia [4].

Sam regulator prędkości oparty był na adaptacyjnym członie regulacji wzmocnienia pętli sprzężenia zwrotnego uzupełnionej o elementy regulatora predykcyjnego dla niskich prędkości obrotowych [5]. Rolą adaptacyjnego regulatora prędkości jest odpowiedni dobór wzmocnienia regulatora uzależnionego od aktualnej prędkości obrotowej.

$$K_{R\omega} = K_{Rom} * K_A \quad (1)$$

$$K_A = \omega / \omega_n \quad (2)$$

gdzie:

$K_{R\omega}$  – wzmocnienie regulatora,

$K_{Rom}$  – wzmocnienie regulatora dla znamionowej prędkości obrotowej,

$\omega_n$  – znamionowa prędkość obrotowa,

$\omega$  – rzeczywista prędkość obrotowa.

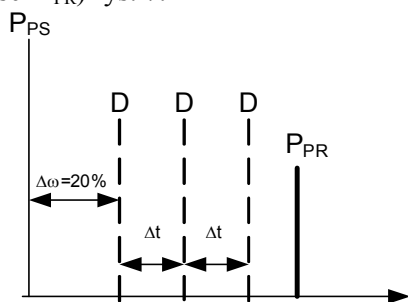
Z uwagi na brak możliwości określenia rzeczywistej chwilowej prędkości obrotowej  $\omega$ , wprowadza się wielkość zastępczą będącą funkcją prędkości zadanej i pomierzonej.

Niestety regulator adaptacyjny nie spełnia swojej roli dla prędkości obrotowych znacząco niższych od znamionowej. W układzie napędowym drzwi kabinowych właśnie ten zakres prędkości jest szczególnie istotny.

Środowisko pracy drzwi sprawia, że konstruktorzy dążą do maksymalnego obniżenia poziomu hałasu i zapewnienia szerokiego zakresu regulacji. Pozycjonowanie drzwi w trakcie procesu dojazdu do skrajnego położenia zarówno podczas otwarcia, jak i zamknięcia odbywa się przy prędkości wielokrotnie niższej niż znamionowa. Szczególnie podczas procesu zamykania, gdzie dochodzi do bezpośredniego kontaktu skrzydeł drzwi z ogranicznikami, konieczne jest ograniczenie ich prędkości przesuwu tak, aby proces zetknięcia płaszczyzn

przebiegał płynnie. Zastosowanie regulatora adaptacyjnego w niezmienionej postaci dla tego zakresu pracy drzwi jest również możliwe po skorygowaniu wartości wzmacnienia dla niskich prędkości obrotowych. Niestety warunki pracy układu napędowego drzwi kabinowych sprawiają, że podczas procesu domykania drzwi przy niskiej prędkości obrotowej bardzo często dochodzi do zablokowania ich przesuwu poprzez zanieczyszczenia gromadzące się w prowadnicach, bądź przez samych pasażerów.

Układ regulacji i kontroli powinien wtedy dokonać szybkiej korekty parametrów sterowania tak, aby sprawnie zamknąć drzwi, bądź w przypadku stwierdzenia przeszkody dokonać nawrotu po przekroczeniu zadanej wartości momentu nacisku. Wzmacnienie regulatora adaptacyjnego byłoby dla niskich prędkości zbyt małe, aby w stosunkowo krótkim czasie dokonać odpowiednich zmian parametrów sterowania. Aby poprawić pracę regulatora w zakresie niskich prędkości obrotowych zdecydowano się zastosować dodatkowy człon regulacji reagujący na zbyt duże opóźnienie w pętli pomiaru prędkości silnika BLDC. W przypadku stwierdzenia spadku prędkości o więcej niż 20% (przekroczenie punktu spodziewanego pomiaru  $P_{PS}$ ) człon ten dokonuje korekty sygnałów sterujących (D) i uaktywnia procedurę dalszej kontroli prędkości. Polega ona na ciągłym korygowaniu parametrów zasilania silnika co zadaną wartość czasu skorelowanego z prędkością zadaną ( $\Delta t$ ) do momentu ponownego zmierzenia prędkości (punkt pomiaru rzeczywistej prędkości  $P_{PR}$ ) rys. 7.



Rys. 7. Zasada działania członu korygującego parametry sterowania przy niskich prędkościach obrotowych

Po dokonaniu pomiaru parametry są korygowane tak, aby przeregulowania w następnym kroku regulacji nie były zbyt duże. Człon ten pełni rolę wspomagającą regulator adaptacyjny przy niższych prędkościach obrotowych. Zbyt duża wartość korekty parametrów sterujących

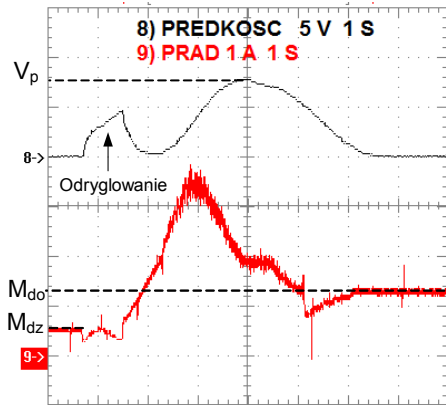
D, bądź zbyt częsta ich korekcja może prowadzić do dużych przeregulowań, ale dzięki nim uniknięto w omawianej aplikacji możliwości utknięcia napędu przy niskich prędkościach obrotowych.

## 6. Pomiary

Pomiary zostały przeprowadzone na układzie rzeczywistym drzwi kabinowych zainstalowanych na stanowisku pomiarowym w firmie Lift Service S.A. Lublin. Szczególną uwagę zwrócono na pomiar prędkości obrotowej i prądu pobieranego przez silnik napędowy w trakcie zamykania (rys. 8) oraz otwierania drzwi kabinowych (rys. 7). Pomiary przeprowadzono dla następujących parametrów układu napędowego:

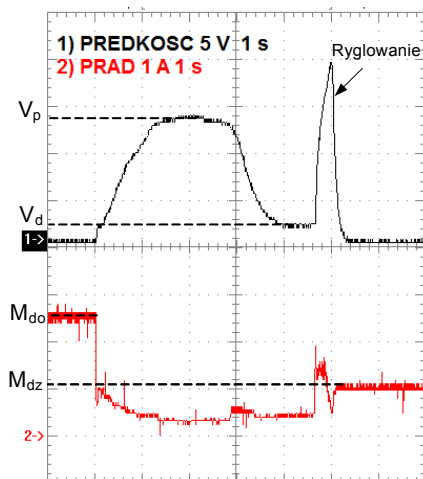
- prędkość otwierania 70%,
- prędkość dojazdowa otwierania 15%,
- prędkość zamykania 50%,
- prędkość dojazdowa zamykania 10%,
- przyspieszenie zamykania 60%
- przyspieszenie otwierania 60%

Zastosowanie mechanicznych elementów pozycjonujących drzwi w pozycji zamkniętej w czasie braku napięcia zasilania powoduje, że napęd podczas otwierania pracuje jako silnik, natomiast podczas zamykania drzwi niemal przez cały czas wytwarza moment hamujący. Możliwość rezygnacji z przekładni planetarnej sprawia, że poprzez znaczące zmniejszenie oporów ruchu możliwe jest zmniejszenie naciągu sprężyn i masy ciężarka, a co za tym idzie znacząca redukcja prądu pobieranego przez silnik. Umożliwia to dobór napędu o mniejszej mocy, a także znaczące zmniejszenie zużycia energii. Na rysunku 7 można zauważyć, że przy zadanych parametrach sterowania (prędkości, parametrów opóźnienia i przyspieszenia) oraz masie drzwi, niemal natychmiast po osiągnięciu prędkości przejazdowej rozpoczyna się hamowanie do prędkości dojazdowej i zatrzymanie w pozycji otwartej z momentem dociskowym  $M_{do}$ . Moment ten przeciwdziała niepożądanemu ruchowi drzwi w trakcie przechodzenia pasażerów przez ich światło i zależy głównie od siły wywieranej przez sprężynę zwrotną lub ciężarek.



Rys. 7. Przebiegi prędkości i prądu podczas otwierania drzwi kabinowych

Podczas procesu zamykania drzwi napęd znajduje się w zakresie pracy generatorowej i wytwarza moment skierowany przeciwnie do momentu napędowego wytwarzanego przez sprężynę zwrotną lub ciężarek rys 8.



Rys. 8. Przebiegi prędkości i prądu podczas otwierania drzwi kabinowych

Zarówno podczas otwierania jak i zamykania drzwi szybowych mamy do czynienia z procesem ryglowania i odryglowywania drzwi. Rygiel jest to urządzenie uniemożliwiające pasażerom znajdującym się na poszczególnych piętrach na ręczne otwarcie drzwi szybowych i jest to element wymagany przez normy bezpieczeństwa. Moment wytwarzany przez układ napędowy podczas docisku drzwi zamkniętych  $M_{dz}$  ma na celu zniwelowanie wpływu przeciążeń występujących podczas ruchu kabiny na układ mechaniczny drzwi mogących w efekcie doprowadzić do przerwania obwodu bezpieczeństwa i awaryjnego zatrzymania dźwigu.

## 7. Podsumowanie

Opracowany układ napędowy drzwi kabinowych przeszedł pomyślnie pierwsze testy na obiekcie rzeczywistym. Zastosowanie układu napędowego z bezprzekładniowym silnikiem BLDC znacząco zredukowało zużycie energii przez cały układ napędowy. Jednocześnie pomimo znacznej komplikacji układu regulacji prędkości w stosunku do silników indukcyjnych, jak i silników BLDC z przekładnią mechaniczną, udało się zachować szeroki zakres regulacji przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów inwestycyjnych. W najbliższym czasie można spodziewać się dalszego dynamicznego rozwoju tego typu napędów i wypierania przez nie napędów przekładniowych małej mocy.

## 8. Literatura

- [1]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2]. Goryca Z.: *Niskonapięciowy, wolnoobrotowy napęd z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, XV Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ustroń 17-19 maj, 2006.
- [3]. Goryca Z., Kolano K.: *Bezprzekładniowy napęd drzwi windy*. XX Seminarium Techniczne BO-BRME - Komel 2011.
- [4]. Krykowski K., Hetmanczyk J.: *Wykorzystanie czujników położenia wirnika w obwodzie regulacji prędkości silnika PM BLDC*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 72/2005
- [5]. Krykowski K., Hetmanczyk J.: *Badania symulacyjne i laboratoryjne silnika PM BLDC wykorzystującego czujnik położenia wirnika w obwodzie regulacji prędkości*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 72/2005.