

Krzysztof Kolano, Jan Kolano
Politechnika Lubelska, Lublin

PROBLEMY ROZRUCHU UKŁADÓW NAPĘDOWYCH WSPÓLCZESNYCH DŹWIGÓW OSOBOWYCH Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM

STARTING UP ROUTINE OF THE ELEVATOR DRIVE SYSTEM WITH INDUCTION MOTOR

Abstract: Modern lift drive systems are very sophisticated and allow to affect almost any part of the speed curve to achieve desirable level of passengers' comfort.

In this paper selected problems of the starting routine of the passengers elevators have been described. The mathematical model of the lift drive system with 3-phase induction motor has been used to examine both frequency converter and motor parameters. The rollback effect of the car during starting up routine has been described. This method of choosing the sets of parameters is very convenient way of selecting an optimal configuration of frequency converter and the motor to achieve "smooth" start of the lift car. Selected plots of phase current, velocity frequency and voltage curves have been shown and described.

1. Wstęp

Nowoczesne systemy sterowania współczesnych układów napędowych, w tym także dźwigów osobowych charakteryzuje rosnąca złożoność wynikająca z coraz wyższych wymagań użytkowników, a także wzrost kosztów aplikacji wynikająca z większej niż kiedykolwiek ich złożoności. Celem stosowania nowych struktur sterowania i rozwiązań technicznych w napędach dźwigów osobowych jest zapewnienie maksymalnego komfortu podróżowania pasażerów i poziomu niezawodności, a także zwiększenie bezpieczeństwa korzystania z tych urządzeń.

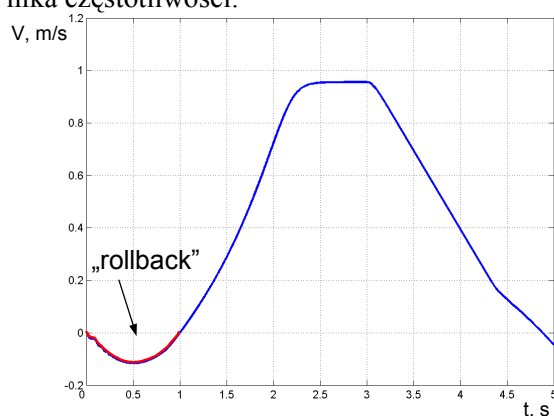
Pomimo zastosowania wysokiej klasy napędów regulowanych złożonych najczęściej z silnika indukcyjnego i przemiennika częstotliwości oraz nowoczesnych topologii sterowania zawierających w swej strukturze wiele urządzeń mikroprocesorowych, zapewnienie odpowiedniego poziomu komfortu podróżowania jest wciąż zadaniem trudnym. Duże zróżnicowanie parametrów technicznych urządzeń napędowych wymuszone przez odmienne zapotrzebowania inwestorów sprawiają, że każde urządzenie dźwigowe musi być traktowane indywidualnie, a zestawy nastaw przemiennika są dobierane w sposób eksperymentalny, co wydłuża czas instalacji układu napędowego i przyczynia się do pogorszenia parametrów eksploatacyjnych całego urządzenia dźwigowego. Szczególnie wymagającym dla układu napędowego z przemiennikiem częstotliwości jest moment

rozruchu. Błędny dobór parametrów przemiennika może doprowadzić do jego nieprawidłowej, zmniejszającej wygodę podróżowania pasażerów pracy, a w skrajnych przypadkach do awaryjnego unieruchomienia lub nawet uszkodzenia napędu.

Zastosowanie komputerowego wspomaganie doboru zarówno samego układu napędowego jak i parametrów przemiennika częstotliwości z uwzględnieniem specyfiki pracy dźwigu, a także jego parametrów elektrycznych i mechanicznych znacząco przyczyniłoby się do skrócenia czasu instalacji, a także wydatnie podnieść może komfort podróżowania.

Stosowane obecnie układy napędowe dźwigów osobowych z dwubiegowym silnikiem indukcyjnym z uwagi na niskie walory eksploatacyjne (ograniczony wpływ na przyspieszenia i przeciążenia pasażerów) są wypierane przez układy przekształtnikowe składające się z przemiennika częstotliwości zasilającego silnik indukcyjny jednobiegowy. Struktura taka umożliwia kształtowanie krzywej jazdy w bardzo szerokim zakresie, co korzystnie wpływa na komfort podróżowania pasażerów. Różnice konstrukcyjne wynikające ze specyficznych dla każdej realizacji życzeń inwestora (udźwig, masa kabiny, prędkość) wymusza na projektantach stosowanie całego typoszeregu maszyn indukcyjnych sprzężonych z odpowiednim przemiennikiem częstotliwości. Różnorodność ta uniemożliwia implementację wspólnych na-

staw przemienników już na etapie produkcji szafy sterowej. Wstępne nastawy rzadko umożliwiają poprawną pracę urządzenia w szerokim zakresie momentów niezrównoważenia kabiny, co wymusza na instalatorach dobór nowych parametrów przemiennika częstotliwości. Z uwagi na brak odpowiednich narzędzi pomiarowych i częsty brak szczegółowej wiedzy teoretycznej dotyczącej napędu z silnikiem indukcyjnym zasilanym napięciem o zmiennej amplitudzie i częstotliwości, modyfikacja parametrów odbywa się w sposób eksperymentalny i rzadko prowadzi do poprawnego działania dźwigu. Fakt ten często zniechęca potencjalnych inwestorów do zainstalowania nowoczesnego układu napędowego z przemiennikiem częstotliwości, który jako droższy i „mniej pewny”, często przegrywa rywalizację z przestarzałymi układami dwubiegowymi, w których kryterium komfortu nie jest kluczowe. Zaletą tego typu układu jest możliwość dostrajania parametrów zasilania silnika w bardzo szerokim zakresie, co przekłada się na możliwość spełnienia coraz wyższych wymagań użytkowników, ale następcza instalatorom i konserwatorom wielu problemów związanych z optymalnym dopasowaniem parametrów przemiennika do konkretnych wciągarek i rodzajów urządzeń dźwignicowych. Oprócz niedogodności związanych ze zmniejszeniem komfortu pasażerów istnieje duże niebezpieczeństwo wystąpienia zjawiska zwanego przez producentów przemienników częstotliwości „rollbackem” (rys. 1.). Zjawisko to charakteryzuje się niekontrolowanym ruchem kabiny tuż po starcie w kierunku przeciwnym do wybranego przez sterowanie kierunku jazdy. Jest ono spowodowane aktywnym momentem oporowym oraz specyfiką rozwijanego momentu napędowego przez silnik zasilany z przemiennika częstotliwości.



Rys. 1. Nieprawidłowa krzywa jazdy dźwigu z przemiennikiem częstotliwości

Tuż po załączeniu napięcia zasilania o obniżonej amplitudzie i częstotliwości silnik nie wytwarza na tyle dużego momentu, aby rozpocząć płynną jazdę w poprawnym kierunku przy dużym niezrównoważeniu układu [2]. Niestety zjawisko to nie jest łatwe do opanowania ze względu na brak narzędzi analitycznych do poprawnego doboru parametrów zasilania silnika przy zmiennych stopniach niezrównoważenia układu. W praktyce instalatorzy tracą bardzo wiele czasu na eksperymentalne dostrojenie parametrów przemiennika częstotliwości tak, aby moment początkowy rozwijany przez silnik był na tyle duży, aby nie wystąpiło zjawisko „rollbacku”, a na tyle płynnie zmieniany, aby pasażerowie nie odczuwali szarpnięć podczas rozruchu. Efekt niekontrolowanego ruchu kabiny w kierunku przeciwnym do zadanego jest szczególnie niepożądany w strukturach z zamkniętą pętlą prędkościowego sprzężenia zwrotnego, w których układ diagnostyczny przemiennika wykrywa tę sytuację i dokonuje automatycznego wyłączenia silnika, wymuszając przyjazd ekipy serwisowej.

2. Wyniki symulacji rozruchu częstotliwościowego i hamowania napędu dźwigowego

Wykorzystując opis matematyczny silnika indukcyjnego [4] oraz uzupełniając go o dodatkowe podzespoły modelujące pracę i sterowanie urządzeń dźwignicowych, można dokonać analizy wszystkich stanów pracy dźwigu, ze szczególnym uwzględnieniem okresu startu, oraz tak dobrać parametry przemiennika częstotliwości, aby zapewnić optymalną pracę układu w pełnym zakresie stanu niezrównoważenia dźwigu.

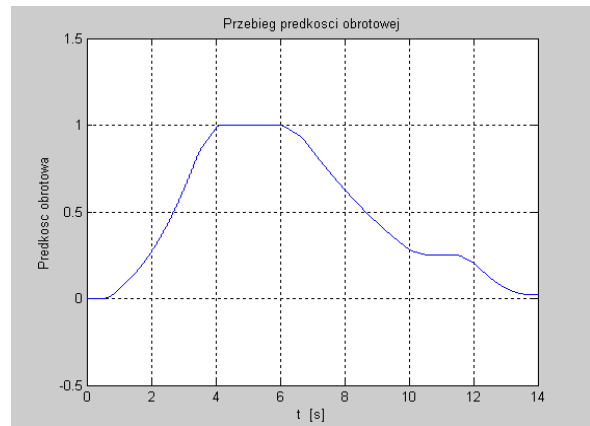
Tab. 1. Wielkości bazowe silników użytych w symulacjach wyznaczone na podstawie danych znamionowych

Silnik:	5,5 kW	8 kW
U_b - napięcie fazowe:	325,3 V	325,3 V
I_b - prąd fazowy:	18,4 A	29,7 A
Ω_b - pulsacja:	314 rad/s	314 rad/s
Z_b - impedancja:	17,7 Ω	10,9 Ω
Ψ_b - strumień skojarzony:	1,036 Wb	1,036 Wb
L_b - indukcyjność:	0,0563 H	0,0349 H
S_b - moc:	8970 VA	14490 VA

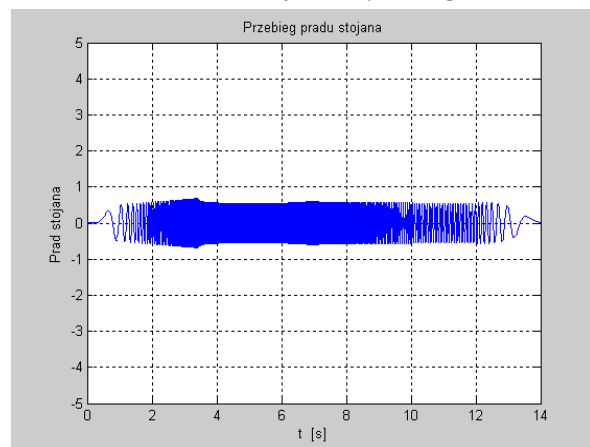
Ω_{mb} - prędkość kątowna mechaniczna:	157 rad/s	104,67 rad/s
M_b - moment obrotowy:	57,13 Nm	138,44 Nm

W przypadku zastosowania układu regulowanego z przetwornicą częstotliwości liczba parametrów warunkujących komfort pasażerów jest zdecydowanie większa i zależy w dużej mierze od specyfiki konkretnego urządzenia i zaimplementowanej w nim tzw. „aplikacji dźwigowej”. Producenci oferują rozwiązania umożliwiające kompleksową kontrolę wszystkich faz pracy pozwalające doświadczonemu serwisowi, za pomocą tych parametrów wpływać na kształt krzywej jazdy. Niestety specyfika układów dźwigów osobowych uniemożliwia stosowanie tych samych ustawień przetwornicy uzależnionych tylko od prędkości i udźwigu konkretnego urządzenia. Różnice wynikające z innego typu zastosowanej wciągarki, jak i pozornie niewielkich różnic konstrukcyjnych powodują, że do niemal każdej aplikacji należy podchodzić indywidualnie i za każdym razem dobierać odpowiednie ustawienia przetwornicy. Powoduje to dość duże problemy związane z uruchomieniem nowego urządzenia, jak również niedogodności wynikające z eksperymentalnego doboru parametrów układu sterowania. Zastosowanie modelu matematycznego silnika zasilanego ze źródła napięcia o zmiennej amplitudzie i częstotliwości umożliwiło symulację pracy takiego układu w szerokim zakresie obciążeń i z różnymi wciągarkami. Rozwiązanie takie ułatwia dobór przetwornicy, jak i umożliwia dobór podstawowych parametrów układu sterowania napędem. Poniżej przedstawiono wybrane przebiegi w jednostkach względnych, uzyskane w programie Matlab-Simulink dla silnika o mocy 5,5 kW.

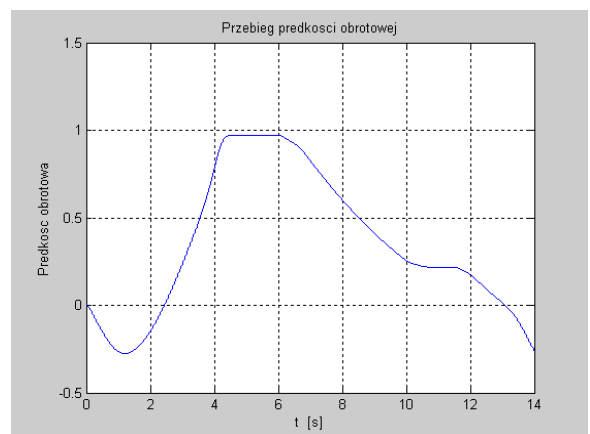
Dla układu zrównoważonego założony wzrost amplitudy napięcia od wartości 0 do wartości znamionowej powoduje łagodny rozruch i zapewnia odpowiedni komfort pasażerom (rys. 2). Niestety dla takiego założenia przy momencie nierównoważenia różnym od zera zauważalne jest wyraźnie zjawisko niekontrolowanego ruchu kabiny w kierunku przeciwnym w stosunku do wybranego przez układ sterowania (rys. 4, rys.5).



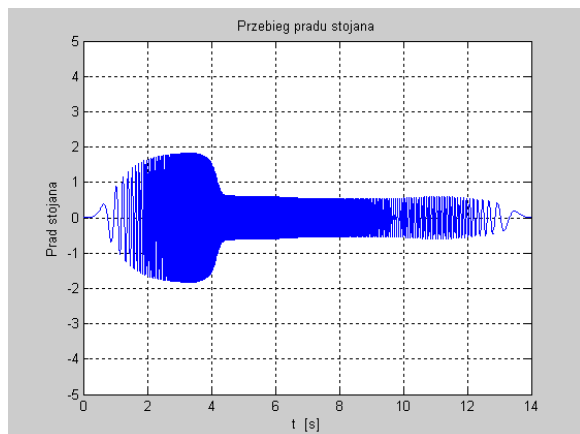
Rys. 2. Przebieg prędkości obrotowej wału silnika dla zrównoważonej kabiny dźwigu



Rys. 3. Przebieg prądu fazowego silnika dla zrównoważonej kabiny dźwigu

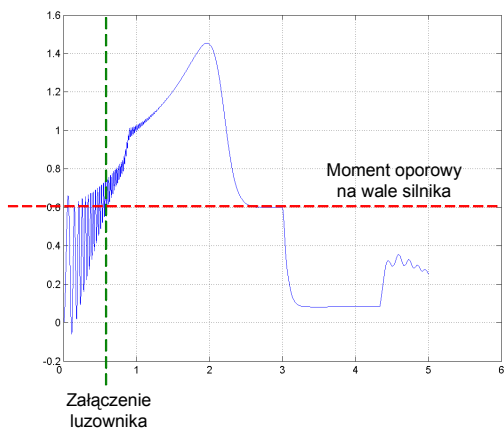


Rys. 4. Przebieg prędkości obrotowej wału silnika dla znamionowo obciążonej kabiny dźwigu



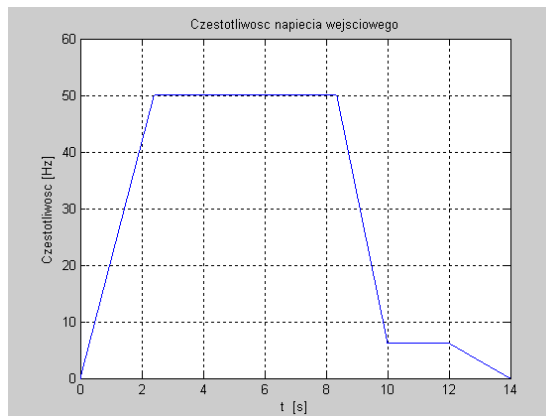
Rys. 5. Przebieg prądu fazowego silnika dla znamionowo obciążonej kabiny dźwigu

W praktyce zjawisko to jest korygowane przez zwiększenie czasu opóźnienia załączenia luzownika, co powoduje uwolnienie wału napędowego silnika dopiero po osiągnięciu przez silnik odpowiednio dużego momentu elektromagnetycznego (rys. 6). Niestety działanie takie powoduje niepotrzebny przestój dźwigu na przystanku, zwiększa zużycie samego luzownika jak i energii elektrycznej konsumowanej przez układ napędowy.

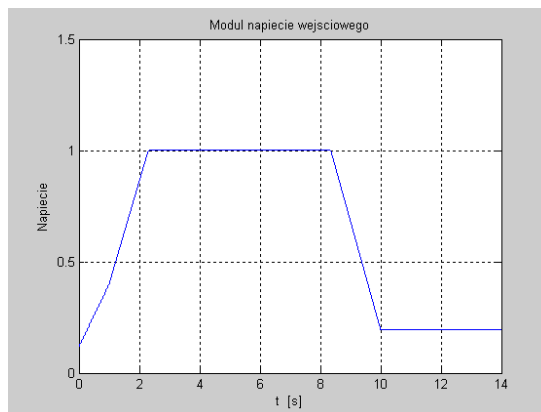


Rys. 6. Przebieg momentu elektromagnetycznego silnika napędowego o mocy 5,5 kW z zaznaczonym momentem załączenia luzownika

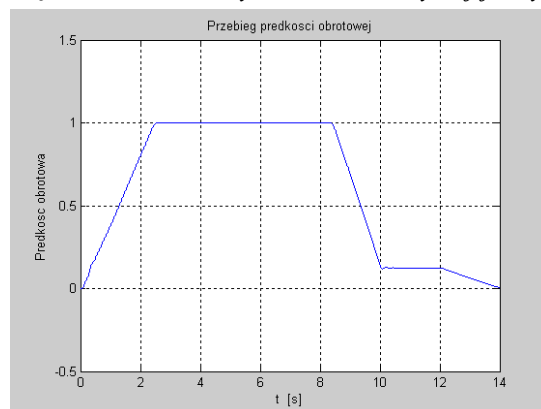
Odpowiednie zwiększenie napięcia zasilania podczas startu może zwiększyć moment napędowy do poziomu, przy którym będzie możliwa poprawna praca układu napędowego w szerokim zakresie momentów niezrównoważenia dźwigu osobowego. Przykład takiego rozwiązania został przeanalizowany w programie Matlab-Simulink, a wyniki symulacji przedstawione są na rys. 7-10.



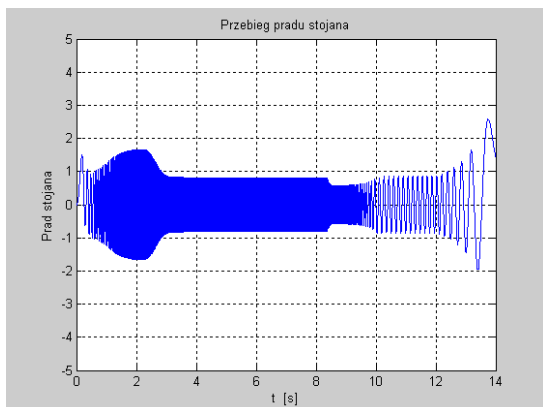
Rys. 7. Przebieg częstotliwości napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości w całym zakresie krzywej jazdy



Rys. 8. Przebieg modułu wektora przestrzennego napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości w całym zakresie krzywej jazdy



Rys. 9. Przebieg prędkości obrotowej wału silnika dla znamionowo obciążonej kabiny dźwigu przy zoptymalizowanych parametrach zasilania



Rys. 10. Przebieg prądu fazowego silnika dla znamionowo obciążonej kabiny dźwigu

W przypadku wystąpienia zjawiska „rollbacku” (rys. 4) zwiększenie stosunku napięcia wyjściowego do częstotliwości powoduje zwiększenie momentu elektromagnetycznego silnika. Wzrost ten powinien być na tyle duży, aby moment napędowy był wystarczający do przeprowadzenia prawidłowego rozruchu układu napędowego dla maksymalnego momentu oporowego. Niestety ustawianie parametrów określających poziom amplitudy napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości (rys. 8) często nie jest poparte żadną analizą wpływu na amplitudę prądu silnika.

Zjawisko to jest szczególnie zauważalne przy niskich wartościach częstotliwości, gdzie reakcja silnika jest znacznie mniejsza od jego rezystancji. Z punktu widzenia obsługi osiągnięty zostanie efekt prawidłowego rozpędzania się i zatrzymania kabiny, niestety bez posiadania odpowiednich urządzeń (oscyloskop, sondy prądowe i napięciowe) optymalny dobór wartości parametrów jest niemal niemożliwy. Jego zbyt duża wartość prowadzi do zwiększenia amplitudy prądu, która może osiągnąć wartości krytyczne dla przemiennika częstotliwości. W skrajnym przypadku kilkuset rozruchów i hamowań wykonanych w krótkim czasie może dojść do uszkodzenia zaworów falownika, a co za tym idzie unieruchomienia kabiny.

Optymalny dobór amplitudy napięcia wyjściowego zapewnia prawidłowy rozruch i hamowanie przy jednoczesnym ograniczeniu prądu silnika napędowego. W takim przypadku nie ma zagrożenia cyklicznego przeciążania przemiennika – a więc uszkodzenia zaworów i w konsekwencji unieruchomienia kabiny i kosztownej naprawy.

3. Określenie czasu opóźnienia załączenia luzownika

Z uwagi na niską samohamowność większości wciągarek a także rygorystyczne normy dźwiękowe dotyczące bezpieczeństwa pasażerów, luzownik pełni funkcję hamulca przeciwdziałającego niekontrolowanemu ruchowi kabiny w czasie, gdy nie jest zasilany silnik. Załączenie luzownika powinno odbyć się dopiero po załączeniu napięcia na zaciski silnika i osiągnięciu przez moment elektromagnetyczny silnika napędowego wartości momentu oporowego na wale. O ile pierwszy warunek jest bardzo prosty do spełnienia – zasilanie luzownika jest realizowane przez szeregowo połączone styki pomocnicze styczników manewrowych, to drugi naraża na wiele problemów. W praktyce opóźnienie załączenia luzownika jest ustawiane z dużym zapasem, co w przypadku obciążenia silnika małym momentem oporowym powoduje, że w chwili uwolnienia wału silnik napędowy dysponuje dużą nadwyżką momentu napędowego. Rozruch z nadwyżką momentu oporowego powoduje zwiększenie przyspieszenia – zrywu. Pasażerowie odczuwają to jako nagłe szarpnięcie podczas startu. Zmniejszenie opóźnienia załączenia luzownika owocuje pojawieniem się zjawiska „rollbacku”, co w układach z enkoderem prowadzi do awaryjnego zablokowania sterowania.

Opracowany model matematyczny układu zasilania napięcia i częstotliwości, a także model luzownika umożliwiają kompleksową analizę pracy całego układu napędowego w szerokim zakresie momentów oporowych dla różnych parametrów sterowania. Matematyczny dobór czasu załączenia luzownika pozwala na optymalny dobór momentu startu, co poprzez zmniejszenie zrywu wpływa korzystnie na komfort podróży.

Aby uzyskać optymalny przebieg procesu rozruchu układu napędowego dźwigu celowym byłoby wykorzystanie czujnika obciążenia kabiny i sprzęgnięcia go z elementem sterującym załączeniem luzownika. Umożliwiłoby to uzależnienie czasu uwolnienia wału silnika od momentu oporowego na wale, co miało by pozytywny wpływ na proces startu kabiny dźwigu.

4. Podsumowanie

Zastosowanie symulacyjnej metody doboru podstawowych parametrów przemiennika czę-

stotliwości i jego nastaw dla konkretnych parametrów układu napędowego dźwigu osobowego uwzględniających parametry charakteryzujące dźwig jako maszynę roboczą, umożliwia znaczne skrócenie czasu realizacji instalacji, a także zmniejszenie jej kosztów przez optymalny dobór przemiennika do silnika napędowego. Prawidłowa praca i wysoki komfort jazdy zachęcić może większą liczbę inwestorów do instalowania nowoczesnych układów napędowych, a aplikacja odpowiednich nastaw przemiennika może odbywać się na etapie produkcji szafy sterowej przy zminimalizowaniu konieczności ich modyfikacji na obiekcie finalnym.

Model matematyczny indukcyjnego silnika zasilanego ze źródła o regulowanej niezależnie amplitudzie i częstotliwości, zgodnie ze strategią sterowania stosowaną w przemiennikach częstotliwości z aplikacją dźwigową, umożliwia w środowisku Matlab-Simulink przeprowadzenie symulacji rozruchu układu napędowego dźwigu osobowego. Zaimplementowany model dźwigu osobowego pozwala zidentyfikować podstawowe problemy pojawiające się podczas rozruchu układu napędowego obciążonego stałym, aktywnym momentem oporowym. Rozwiązanie tych problemów realizowane jest poprzez modyfikację nastaw i ich przetestowanie podczas przeprowadzania symulacji komputerowej aż do uzyskania zadowalających rezultatów.

Literatura

- [1]. Howkins Roger E.: „*Elevator Ride Quality -The Human Ride Experience*” World elevator -Jun.2007
- [2]. Kolano Krzysztof „*Sterowanie układów napędowych dźwigów osobowych z silnikiem indukcyjnym*” Rozprawa doktorska Politechnika Lubelska 2009r.
- [3]. Kwaśniewski J.: „*Dźwigi osobowe i towarowe. Budowa i eksploatacja*”. Kraków, Wyd. AGH 2004;
- [4]. Orłowska – Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi* Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2003r.
- [5]. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Gliwice, Wyd. Helion 1998;