

**Kazimierz Jagiela, Marek Gała, Janusz Rak, Marian Kępiński**  
**Politechnika Częstochowska, Częstochowa**

## NAPĘDY PRZEMIENNIKOWE SUWNICY CHWYTAKOWEJ

### VARIABLE FREQUENCY DRIVES OF OVERHEAD CRANE WITH GRIPPER

**Streszczenie:** W artykule opisano struktury i właściwości napędów mechanizmów suwnicy chwytkowej. Umożliwiają one przemieszczenie transportowanego elementu w trzech osiach:  $x$  (jazda mostem),  $y$  (jazda wózkiem) oraz  $z$  (podnoszenie - opuszczanie). Układy napędowe wyposażone są w silniki asynchroniczne klatkowe zasilane z przemienników częstotliwości. Sterowanie pracą suwnicy wspomagane jest sterownikiem PLC. Zamieszczono przebiegi czasowe podstawowych wielkości elektromechanicznych dla napędów suwnicy przy podnoszeniu i opuszczaniu ciężaru oraz podczas jego transportu poziomego wzdłuż osi  $x$  i  $y$ . Do rejestracji przebiegów wykorzystano oprogramowanie narzędziowe DriveWindow dedykowane do parametryzacji oraz monitorowania pracy przekształtnikowych układów napędowych firmy ABB.

**Abstract:** The paper describes the structure and properties of the overhead crane drives. They allow the movement of the transported item in three axes:  $x$  (driving the bridge),  $y$  (driving the trolley) and  $z$  (lifting - lowering). Drive systems are equipped with squirrel cage induction motors powered by frequency converters. Control of the crane is supported with PLC. The temporal waveforms of the basic quantities of electro-mechanical drives for lifting and lowering the weight and during its horizontal transport along the  $x$  and  $y$  axis are presented. DriveWindow software tool was used to record the signals. This software is dedicated to the parameterization and monitoring of the ABB drive systems.

**Słowa kluczowe:** suwnica, napęd prądu przemiennego, silniki indukcyjne, przemiennik częstotliwości  
**Keywords:** overhead crane, AC drive, induction motors, frequency inverter

### 1. Wstęp

Suwnice są urządzeniami transportu bliskiego wykorzystywanymi w różnych gałęziach przemysłu do przenoszenia ciężkich obiektów i elementów o dużych gabarytach [7, 8, 12]. Klasykne napędy mechanizmów suwnicy zawierały silniki asynchroniczne pierścieniowe z włączonymi w obwód wirnika rezystorami rozruchowo-regulacyjnymi podzielonymi na 4÷5 stopni. Rozruch wybranego mechanizmu suwnicy (podnoszenie, jazda suwnicy, jazda wciągarki) polegał na podaniu napięcia na uzwojenie stojana silnika przy włączeniu maksymalnej wartości rezystancji w obwód wirnika [5, 8, 9]. W dalszym etapie następowała regulacja prędkości silnika przez stopniowe zmniejszanie rezystancji za pomocą styczników. Rewers napędu odbywał się przez zmianę kolejności faz zasilania stojana za pomocą styczników liniowych [10]. Tradycyjne napędy suwnic z silnikami asynchronicznymi pierścieniowymi mają szereg wad [5, 8, 9, 13]:

- regulacja prędkości jest skokowa,
- wartość prędkości zmienia się z obciążeniem,
- podczas rozruchu i zmiany prędkości występują szarpnięcia mechaniczne i udary prądu,
- liczba łączy styczników jest ograniczona,

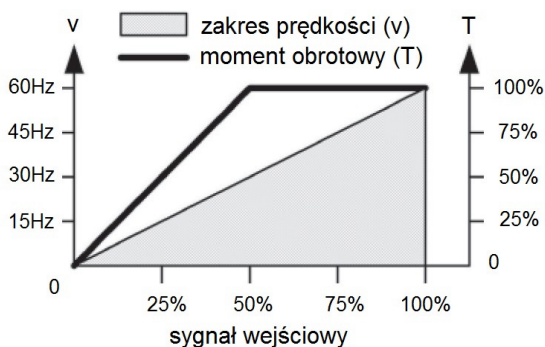
- występuje szybkie zużycie elementów mechanicznych,
- wysoka cena rezystorów rozruchowych (fechalowych) i silników pierścieniowych,
- sprawność napędu jest niska.

Obecnie w wyniku rozwoju energoelektroniki oraz systemów sterowania w napędach mechanizmów suwnic stosuje się silniki klatkowe zasilane z przemienników częstotliwości. Takie rozwiązanie umożliwia ciągłą regulację prędkości, a rewers napędu uzyskuje się w wyniku zmiany sekwencji faz podawanych przez falownik [8, 9, 10]. Zapewniona jest lepsza kontrola ruchów suwnicy i precyzyjne pozycjonowanie. Zastosowanie przetwornic częstotliwości daje istotne korzyści w postaci oszczędności energii oraz zwiększenia niezawodności pracy i trwałości mechanizmów dzięki ograniczeniu przeciążeń dynamicznych związanych z gwałtownym startem i zatrzymaniem [5, 13].

### 2. Współczesne układy sterowania napędami suwnic

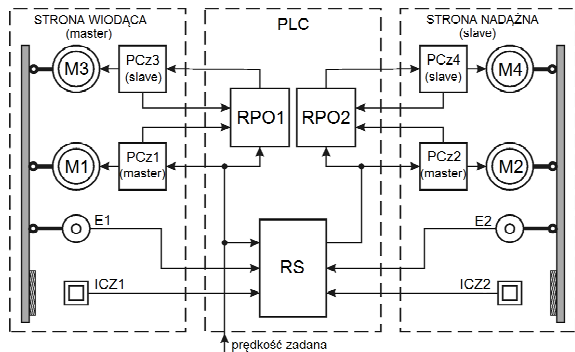
We współczesnych rozwiązaniach napędów mechanizmów suwnic stosuje się silniki indukcyjne klatkowe, a rozruch i regulacja prędkości

realizowane są za pomocą przemienników częstotliwości [7-9, 11-13]. O ile w latach 90. XX wieku instalowano przekształtniki pracujące ze sterowaniem skalarnym U/f, to obecnie stosuje się przemienniki ze sterowaniem wektorowym lub DTC [5, 12]. Przy takim algorytmie sterowania można stosownie do potrzeb kształtować charakterystyki momentu i prędkości w wymaganym zakresie regulacji (rys. 1) [12].



Rys. 1. Charakterystyki prędkości i momentu napędu falownikowego mechanizmu suwnicy [12]

Przekształtniki pozwalają na płynną regulację prędkości silników napędowych przy ciągłej kontroli ich parametrów pracy w pętli sprzężenia zwrotnego [5]. Szczególne wymagania dotyczą napędu jazdy mostu. Zastosowanie odrębnych falowników, pracujących w trybie master-slave, zasilających silniki jezdne mostu i współpracujących z enkoderami, zapewnia ograniczenie zjawiska „skoszenia” suwnicy dzięki utrzymaniu współbieżności jazdy obu stron mostu suwnicy z dokładnością  $< 0,1\%$  [11]. Przykład wielosilnikowego napędu jazdy mostu z kontrolą skoszenia pokazano na rysunku 2 [8].



Rys. 2. Schemat wielosilnikowego napędu jazdy suwnicy z kontrolą skoszenia [8]

$M1 \div M2$  – silniki asynchroniczne napędu mostu;  
 $PCz1 \div PCz4$  – przetworniki częstotliwości;  $E1, E2$  – enkodery;  $ICZ1, ICZ2$  – indukcyjne czujniki zbliżeniowe;  $RPO1, RPO2$  – regulatory podziału obciążenia;  $RS$  – regulator skoszenia;  $PLC$  – układ sterowania programowego

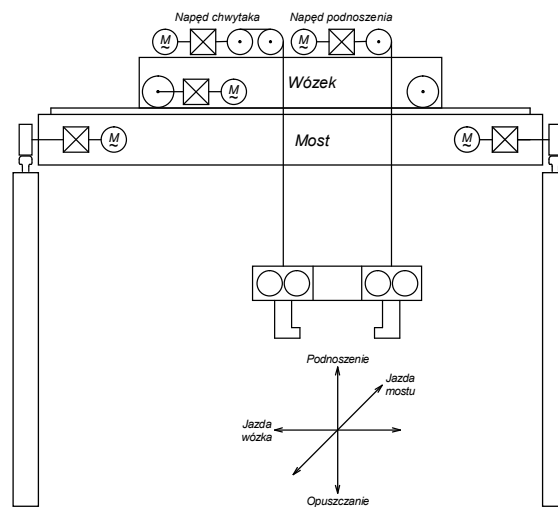
Oprócz napędów mechanizmów jazdy wyposażenie współczesnych suwnic obejmuje [11, 12]:

- fotooptyczne układy antykolizyjne,
- system ograniczenia udźwigu z czujnikami tensometrycznymi,
- urządzenia zasilania powrotnego (zwrot energii do sieci),
- systemy radiowego zdalnego sterowania.

Informacje z poszczególnych systemów są zbierane i przetwarzane w układzie sterowania programowego (PLC) realizującym bezpieczną pracę mechanizmów suwnicy stosownie do wymagań przepisów Dyrektywy Maszynowej 2006/42/WE [5].

### 3. Opis funkcjonalny instalacji suwnicy chwytkowej

Rożmieszczenie napędów suwnicy chwytkowej przedstawiono na rysunku 3. Pokazano na nim zasadnicze instalacje związane z napędami elektrycznymi realizującymi przypisane funkcje w zakresie bliskiego transportu ciężkich płyt w obrębie przemysłowego gniazda technologicznego. Suwnica chwytkowa wyposażona jest w napędy: podnoszenia-opuszczania, który zintegrowany jest mechanicznie z napędem naciągu i zamykania kleszczy chwytaka. Kolejnymi urządzeniami są napędy jazdy mostu i wózka suwnicy. Na wózku suwnicy posadowiono napędy podnoszenia, chwytaka i jazdy wózka. Z tego powodu doprowadzenie instalacji elektrycznej do tych urządzeń wymaga zastosowania ruchomych przewodów podwieszonych na przesuwających się rolkach tzw. wózkach kablowych lub połączeń wyposażonych w prowadniki gąsienicowe oferowane np. przez firmę [14].



Rys. 3. Schemat napędów suwnicy chwytkowej

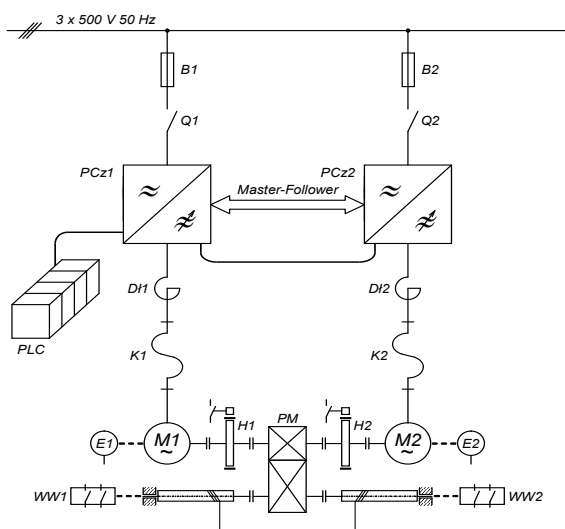
Zasadnicze parametry techniczne suwnicy wynikają z wymogów procesu technologicznego. Zadaniem suwnicy jest transport gorących płyt z pieca do urządzeń hartowniczych w bardzo krótkim czasie, nieco większym niż minutę, co wymusza stosowanie dużych prędkości przy podnoszeniu i opuszczaniu ciężaru, a także podczas jazdy suwnicy, przy jednoczesnym spełnieniu warunku eliminacji drgań lin w trakcie transportu. Urządzenia elektryczne suwnicy zasilane są z sieci przemysłowej 3×500 V 50 Hz pracującej w układzie IT. Zasilanie urządzeń zrealizowano stosując podwójny system przesuniętych płaszczynowo ślizgowych żeliwnych odbieraków prądowych typu 3201B o prądzie ciągłym 400 A przyłączonych sprężyscie do otwartych trolei szynowych z szynami typu KP100. Dla zwiększenia pewności ruchowej w układzie zasilania zastosowano ochronniki przepięciowe typu DEHN oraz zabezpieczenia monitorujące stan izolacji sieci VIGIREX.

#### 4. Napęd podnoszenia - opuszczania

Napęd podnoszenia jest jednym z ważniejszych urządzeń suwnicy z dwóch powodów:

- 1) wartości zainstalowanej mocy oraz sposobu sterowania i kontroli ruchu,
- 2) zachowania bezpieczeństwa pracy i pewności ruchowej podczas eksploatacji.

Spełnienie tych warunków wiąże się z zastosowaniem układu napędowego wyposażonego w dwa identyczne silniki asynchroniczne klatkowe połączone mechanicznie na jeden wspólny wał przekładni redukcyjnej zespolonej z wałem pędym zespołu lin.



Rys. 4. Układ napędowy mechanizmu podnoszenia-opuszczania suwnicy chwytakowej

Schemat zasilania elektrycznego z uwzględnieniem połączeń mechanicznych i wyposażenia w czujniki kontrolno - pomiarowe przedstawiono na rysunku 4.

Silniki asynchroniczne napędu zasilane są indywidualnie z niezależnych przemienników częstotliwości PCz1 i PCz2 dedykowanych do napędów dźwignicowych. System napędowy posiada możliwość pracy z rekuperacją energii elektrycznej do sieci w czasie opuszczania ciężaru i hamowania. Silniki lewy i prawy wyposażone są w niezależne elektrohydrauliczne układy hamulcowe H1 i H2 oraz enkodery E1 i E2 zapewniające stabilizację prędkości obrotowej silników zasilanych z przemienników częstotliwości pracujących w układzie MASTER-FOLLOWER. Na obu końcach wałów naciągu lin do podnoszenia ciężaru zamontowane są wyłączniki wrzecionowe WW1 i WW2 (rys. 4) pełniące funkcję czujników minimalnej i maksymalnej długości liny. Podstawowe dane techniczne zespołu napędowego suwnicy do podnoszenia i opuszczania ciężaru przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

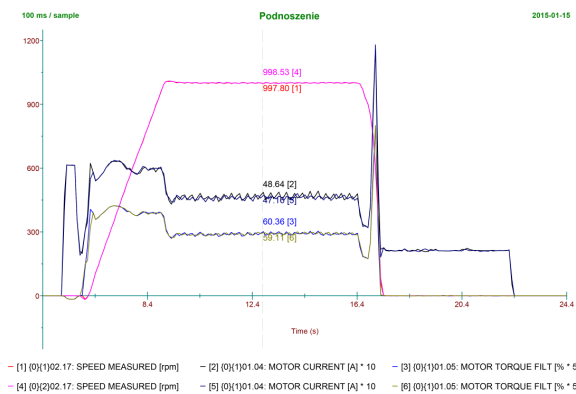
Wartości parametrów układu napędowego podnoszenia-opuszczania suwnicy chwytakowej

Oznaczenie	Typ i parametry
PCz1, PCz2	ACS800-11-0100-7+L509+N651 U=3x690 V; I=99A
M1, M2	2Sg280M6-v; P=55 kW; U=500V; I=76 A; n=985 obr/min
H1, H2	THE 400
E1, E2	Kübler 8.A02H.524A.1024.0020
PM	M=16630 Nm; i=50:1
$V_{max} (n=n_N)$	27 m/min

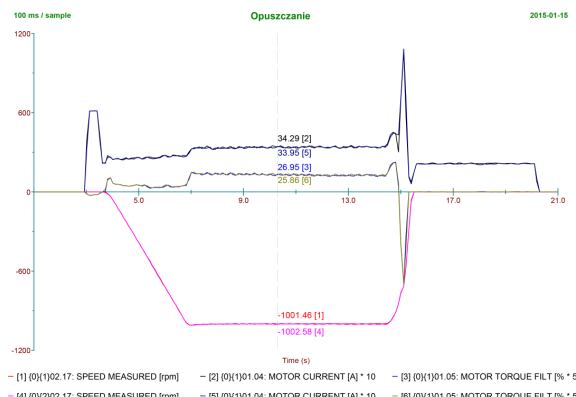
W napędzie podnoszenia i opuszczania ciężaru z uwagi na swoją specyfikę zostało zastosowane sterowanie typu master-slave polegające na połączeniu światłowodowym przemienników PCz1 i PCz2 z tym, że przemiennik master PCz1 jest sterowany bezpośrednio ze sterownika PLC SIMATIC (rys. 4). W celu uniknięcia asynchronizmu prędkości kątowych silników M1 i M2 i nierównomiernego ich obciążenia, wprowadzono zewnętrzne sprzężenia zwrotne wykorzystując sygnały przekazywane z enkoderów E1 i E2 zainstalowanych na wałach silników napędowych. Taki system zapewnia stabilny, współbieżny ruch wałów obu sil-

ników mechanicznie sprzężonych za pośrednictwem przekładni PM. Ponadto przemienniki częstotliwości wyposażone są w odpowiednie interfejsy z aplikacją dźwignicową [1-3] do sterowania hamulców elektrohydraulicznych H1 i H2, których sygnały kontroli położenia szczęk doprowadzone są do sterownika PLC.

Na etapie uruchamiania urządzeń napędowych mechanizmów suwnicy chwytakowej oraz podczas monitorowania działania zespołu bardzo przydatny był program komputerowy ABB DriveWidows [4, 6]. Jest to aplikacja dedykowana do bieżącej parametryzacji napędów przekształtnikowych oraz pomiarów wielkości elektromechanicznych dla różnych warunków pracy. Zarejestrowane przebiegi czasowe prędkości, prądu i momentu elektromechanicznego dla dwóch silników w czasie podnoszenia i opuszczania przedstawiono na rysunkach 5 i 6. W obu przypadkach obserwuje się dużą zgodność przebiegów dla napędu master i napędu slave.



Rys. 5. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej, prądu i momentu dla obu silników napędu w trakcie podnoszenia

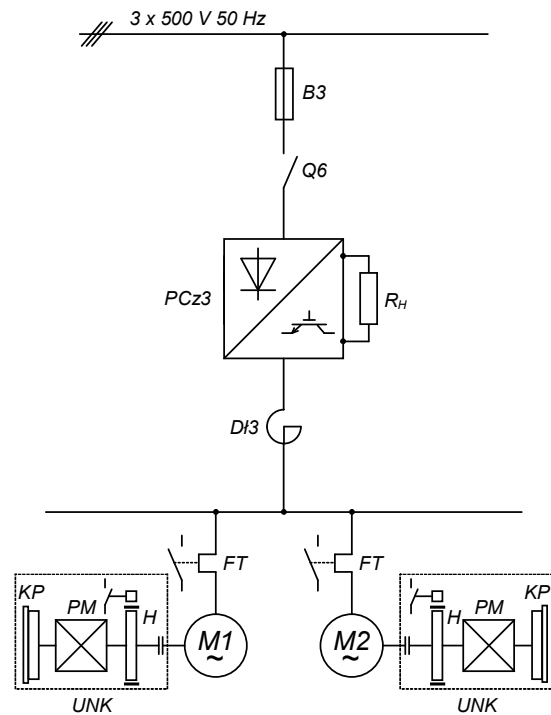


Rys. 6. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej, prądu i momentu dla obu silników napędu w trakcie opuszczania

## 5. Napędy jazdy mostu i wózka suwnicy

Napędy jazdy mostu i wózka suwnicy z uwagi na swoje przeznaczenie z technicznego punktu widzenia są do siebie bardzo podobne. Most suwnicy może posiadać cztery niezależne napędy, każdy na osobne koło pędne lub dwa napędy na koła pędne dla obu szyn toru jezdneho. Wózek suwnicy, o mniejszych gabarytach, wymaga stosowania napędu niezależnego na dwa koła pędne lub jeden napęd na wspólną oś dwu kół pędnych szyn toru jezdneho. Na wózku suwnicy posadowione są napędy podnoszenia, jazdy wózka oraz napęd zakleszczenia chwytaka. Wszystkie te urządzenia, wraz z czujnikami znajdującymi się na obszarze wózka wymagają ruchomej instalacji kablowej w postaci wózka kablowego z liną ciągnącą lub przewodników przewodów np. igus® [14].

Schemat napędu jazdy mostem suwnicy przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Układ napędowy mechanizmu jazdy mostu suwnicy chwytakowej

Przemienniki częstotliwości napędów jazdy mostem i wózkiem suwnicy wyposażone są w rezystory hamowania  $R_H$  (rys. 7), na których podczas hamowania wytracana jest energia kinetyczna, przy czym ich temperatura kontrolowana jest przez sterownik PLC. Sterowanie hamulcami elektrodynamicznymi H odbywa się za pośrednictwem sygnałów podawanych ze sterownika PLC, do którego zwrotnie przycho-

dzą sygnały potwierdzenia zwolnienia hamulców. Parametry techniczne napędów jazdy mostu i wózka suwnicy chwytakowej zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2.

Wartości parametrów układów napędowych jazdy mostu i wózka suwnicy chwytakowej

Oznaczenie	Typ i parametry
<b>Napęd jazdy mostu</b>	
PCz3	ACS800-01-070-7+D150+L502+N652 U = 3×690 V; I = 79A
M1, M2	3Sg180L4-v P = 22 kW; U = 500 V Δ I = 31 A; cos φ = 0,9 n = 1465 obr/min
H	THE 300
PM	M=4900 Nm; i=31,5:1
<b>Napęd jazdy wózka</b>	
PCz3	ACS800-01-020-7+N652 U=3×690 V; I=79A
M1	3Sg160L6-v P = 11 kW; U = 500 V Δ I = 17,5 A; cos φ = 0,82 n = 960 obr/min
H	THE 200
PM	M = 2200 Nm; i = 31,5:1

W układzie sekwencyjnego sterowania jazdy mostem i wózkiem przewidziano kilka zmiennych skokowo nastaw, których wartości zestawiono w tabeli 3.

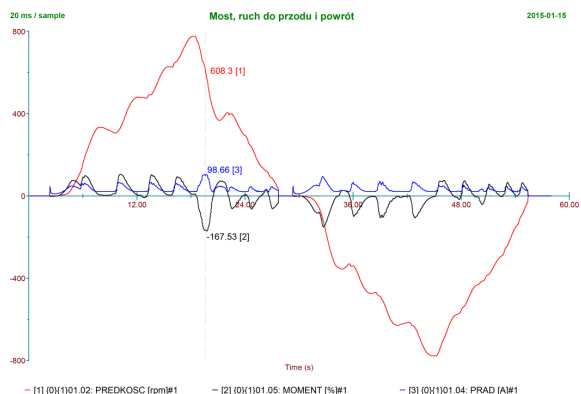
Tabela 3.

Stopniowe wartości prędkości mechanizmu jazdy mostem i wózkiem suwnicy chwytakowej

Stopniowe wartości zadanych prędkości obrotowych [obr/min]					V <sub>max</sub>
1°	2°	3°	4°	5°	[m/min]
<b>Napęd jazdy mostu</b>					
150	300	450	600	750	116
<b>Napęd jazdy wózka</b>					
200	400	600	960	-	38

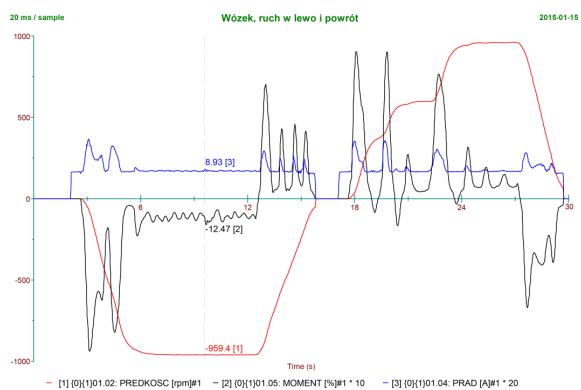
Na podstawie pomiarów wykonanych przy pomocy oprogramowania diagnostycznego DriveWindows zaprezentowano na rysunkach

8 i 9 przebiegi prędkości obrotowej, prądu i momentu elektromagnetycznego dla napędu jazdy mostem i wózkiem podczas wolnej skokowej zmiany wartości zadanych podawanych z manipulatora operacyjnego.



Rys. 8. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej, prądu i momentu dla napędu jazdy mostem suwnicy

Na pokazanych oscylogramach przebiegów zmian parametrów elektromechanicznych napędu jazdy mostem (rys. 8) wyraźnie widoczne są cztery poziomy prędkości obrotowej w obu kierunkach jazdy: do przodu i do tyłu. Czas martwy podczas rewersu napędu został skrócony do minimum i uzależniony jest od efektywności przemiany energii kinetycznej na energię cieplną wydzielaną w rezystorze hamowania R<sub>H</sub>. Aby nie dopuścić do przegrzania i uszkodzenia rezystora kontrolowana jest jego temperatura, a odpowiedni sygnał doprowadzony jest do obwodu blokad w programie sterownika PLC.



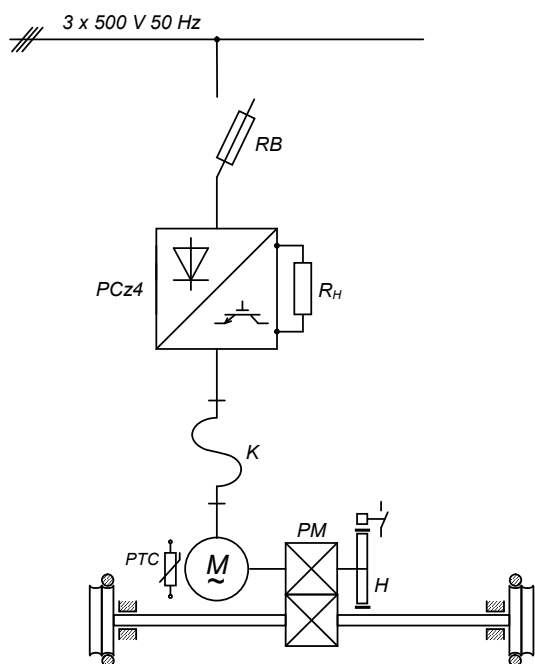
Rys. 9. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej, prądu i momentu dla napędu jazdy wózkiem suwnicy

Na rysunku 9 zarejestrowany został proces zmiany kierunku jazdy wózka z maksymalnej prędkości do tyłu na stopniowaną (trzy stopnie)

prędkość jazdy wózka do przodu. Każda zmiana wartości zadanej prędkości podawanej z manipulatora powoduje zwiększenie prądu i momentu, przy czym ich wartości stabilizują się na poziomie wynikającym z bieżącego obciążenia silnika.

## 6. Napęd chwytnika suwnicy

Naciągnięcie lin stalowych i przesuw dwu ramion wielohakowych wzdłuż płaszczyzny podnoszonego ciężaru realizowane jest przez napęd chwytnika, którego schemat przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Układ napędowy chwytnika suwnicy

Silnik asynchroniczny klatkowy napędu chwytnika zasilany jest kablem ruchomym K, podłączonym do wyjścia przemiennika częstotliwości PCz4, który wyposażony jest w rezystor hamowania  $R_H$ . Silnik jest sprzężony mechanicznie z wałem szybkobieżnym przekładni mechanicznej PM oraz hamulcem elektrohydraulicznym H. Dwa końce wału wolnobieżnego przekładni wyposażone są w bębny nawijające służące do zaciągania lin stalowych. Stan naprężenia lin i zakleszczenia liniałów chwytnika sygnalizowany jest przez odpowiedni czujnik, który powoduje wyłączenie silnika napędu chwytnika. Parametry techniczne zespołu napędowego chwytnika zostały przedstawione w tabeli 4.

Tabela 4.

Wartości parametrów układu napędowego chwytnika

Oznaczenie	Typ i parametry
PCz4	ACS800-01-011-7 U=3x690 V; I=13A
M	FSg100L6; P=1,5 kW; U=500V; I=3,1 A; n=945 obr/min
H	THE 160
PM	M=2500 Nm; i=160:1
n	n=800 obr/min → v=4 m/min

Sterowanie hamulcem H odbywa się z poziomu sterownika PLC, na którego wejście podany jest sygnał n.o. wyłącznika krańcowego położenia szczęk hamulca.

## 7. Podsumowanie

Suwnice stanowią podstawowe urządzenia technologiczne w wielu gałęziach przemysłu. Ze względu na wartości mocy silników zainstalowanych w poszczególnych mechanizmach napędowych są one ważnym obiektem regulacji rozpatrywanym również pod kątem efektywnego wykorzystania energii elektrycznej. Z tego powodu na etapie modernizacji lub przy realizacji nowych inwestycji zaleca się stosowanie urządzeń napędowych wyposażonych w silniki asynchroniczne klatkowe zasilane z przemienników częstotliwości typu DTC, najlepiej z aplikacją zwrotu energii do sieci. Szczególnie ważne jest to dla jednostek przeznaczonych do mechanizmów podnoszenia i opuszczania, dla których z uwagi na bezpieczeństwo zaleca się stosowanie podwójnych zestawów napędowych pracujących w układzie master-slave, z wykorzystaniem sterowania poprzez łącze światłowodowe. Oferowane przez czołowe firmy nowoczesne układy napędowe dedykowane do urządzeń dźwignicowych charakteryzują się możliwością niezależnego sterowania sekwencyjnego lub przystosowane są do współpracy ze sterownikami PLC tak, jak opisano w niniejszej publikacji. Zastosowanie autonomicznego sterownika PLC pozwala na rozszerzenie możliwości funkcjonalnych systemu sterowania o monitorowanie bieżącej pracy suwnicy, raportowanie poszczególnych czynności operatorskich wykonywanych w kabinie lub przy użyciu sterowania radiowego.

Do opisywanych układów napędowych suwnicy chwytakowej na etapie prac rozruchowych urządzenia wykorzystano komercyjne oprogramowanie firmy ABB typu DriveWindow, które pozwala na bieżącą optymalizację parametryczną oraz sekwencyjną poszczególnych sygnałów generowanych przez przemienniki typu ACS.

## 8. Literatura

- [1]. ACS 800 CraneDrive Control. Firmware Manual. ABB, 2006.
- [2]. ACS 800 wybrane funkcje programowe dla aplikacji dźwigowych. ABB 2007.
- [3]. ACS 800 Napęd dźwigowy. ABB 2003.
- [4]. DriveWindow 2. User's Manual. ABB 2008.
- [5]. Dobrzyniecki K.: *Wydłużenie żywotności części maszyn przez zastosowanie przekształtników w układach napędowych suwnic*. Utrzymanie Ruchu, 2011 Nr 7 (75), s. 24-29.
- [6]. Gała M., Rak J., Kępiński M., Jagieła K.: *Zastosowanie oprogramowania DriveWindow w procesie diagnozowania stanów pracy układów napędowych AC i DC*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 82/2009, V-2009, s. 33-38 (ISSN 0239-3646).
- [7]. Kosucki A.: *Badania transportu ładunków przy wykorzystaniu skojarzonych ruchów mechanizmów suwnic pomostowych*. Zeszyty Naukowe Nr 1175 Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2013.
- [8]. Mitrovic N., Petronijevic M., Kostnic V., Jeftenic B.: *Electrical Drives for Crane Application, Mechanical Engineering*, Dr. Murat Gokcek (Ed.) 2012, In-Tech: <http://www.intechopen.com/books/>
- [9]. Nadhe S.T., Lakade S.N., Shinde A.S.: *Up gradation of Overhead Crane using VFD*. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, Issue 3, March 2014, p. 7816-7822.
- [10]. Paul A.K., Gangadaran M., Mazumder S., Neogi N.: *AC operated EOT crane control with variable voltage variable frequency drive*. Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996, vol. 2, p. 857-861.
- [11]. <http://www.elektro-trading.com.pl>
- [12]. <http://www.engineeredlifting.com/pdfs/>
- [13]. <http://www.hak.com.pl>
- [14]. <http://www.igus.pl/>