

## Napęd trakcyjny z inteligentnymi modułami mocy i sterownikiem PLC

*W artykule podano podstawowe informacje o napędzie przekształtnikowym z modułami IPM zmodernizowanej lokomotywy Ld 30. Opisany przekształtnik i silnik trakcyjny Lda 327a (45 kW) wykorzystano do budowy laboratoryjnego stanowiska napędu trakcyjnego ze sterownikiem PLC w układzie regulacji. Zamieszczono także, uzyskane na stanowisku, przebiegi prądu silnika i prędkości napędu w odniesieniu do różnych nastaw regulatorów. Modyfikacje programu realizowanego przez sterownik PLC pozwoliły na zaprezentowanie możliwości korekcji przebiegów prądu silnika w wybranych stanach pracy.*

### 1. WPROWADZENIE

---

Na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych (obecnie Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii) Akademii Górniczo-Hutniczej opracowano tyrystorowe układy sterowania dołowych elektrycznych lokomotyw kopalnianych TUSDELK. Były one wykorzystywane przy produkcji nowych lokomotyw oraz, przede wszystkim, przy modernizacji już eksploatowanych lokomotyw ze sterowaniem oporowym typu Ld 31, Ld 21, Ld 30. Produkcja i serwis układów TUSDELK są prowadzone przez firmę ELSTA z Wieliczki.

Pojawienie się na rynku elementów półprzewodnikowych w pełni sterowalnych, takich jak tranzystory IGBT czy moduły IPM, spowodowało odchodzenie od tyrystorów SCR przy konstruowaniu układów energoelektronicznych, jak również przekształtników impulsowych prądu stałego. Wykorzystanie modułów IPM pozwala, poprzez wyeliminowanie obwodów komutacyjnych niezbędnych w przypadku stosowania tyrystorów SCR, na budowę przekształtników o uproszczonej strukturze i zasadzie sterowania. Maleją gabaryty przekształtnika, a jego praca staje się praktycznie bezgłośna.

Dzięki współpracy KANiUP AGH i ZUE ELSTA w roku 2006 w Zakładach Górniczych Polkowice-

Sieroszowice oddano do użytku lokomotywę Ld 30 wyposażoną w układ TUSDELK z tranzystorowym przekształtnikiem impulsowym z modułami IPM.

Sterowniki PLC są dziś powszechnie stosowane w układach automatyki. Programowa realizacja zadania sterowania pozwala na wykorzystanie ich w bardzo szerokim spektrum procesów technologicznych. Uniwersalność sterowników PLC skutkuje jednak pewną nadmiarowością sprzętową w przypadku konkretnych zastosowań, co między innymi sprawia, że nie stosuje się ich w układach produkowanych seryjnie. Często jednakże są one najlepszym rozwiązaniem w przypadku produktów jednostkowych lub modernizacji pojedynczych urządzeń.

Typowe zadanie sterownika PLC to realizacja sterowania procesem technologicznym, którego stan reprezentowany jest w sterowniku przez zmienne powolne [2], to jest zmienne, których najkrótszy czas trwania określonego stanu jest dłuższy od czasu realizacji cyklu programowego przez sterownik. Przykładowo, w ramach wykonanej przez KANiUP AGH w roku 1999 dla ZG Polkowice-Sieroszowice modernizacji układu napędowego kopalnianej lokomotywy LGT 22 zastosowano elektroniczny sterownik analogowy do bezpośredniego sterowania przekształtnikiem impulsowym prądu stałego, natomiast funkcje sterowania nadrzędnego, związane na przykład z pracą lokomotyw w układzie ukrotnionym, były

realizowane przy pomocy programowalnego sterownika PCD2 M120 firmy SAIA [4].

Przetwarzanie zmiennych szybkich, niezbędne w układach regulacji napędów przekształtnikowych, jest zadaniem stawiającym znacznie wyższe wymagania sterownikowi. Warunek konieczny prawidłowego sterowania – praca w czasie rzeczywistym – nabiera wtedy szczególnego znaczenia.

## 2. TRANZYSTOROWY UKŁAD STEROWANIA ZMODERNIZOWANEJ LOKOMOTYWY LD 30

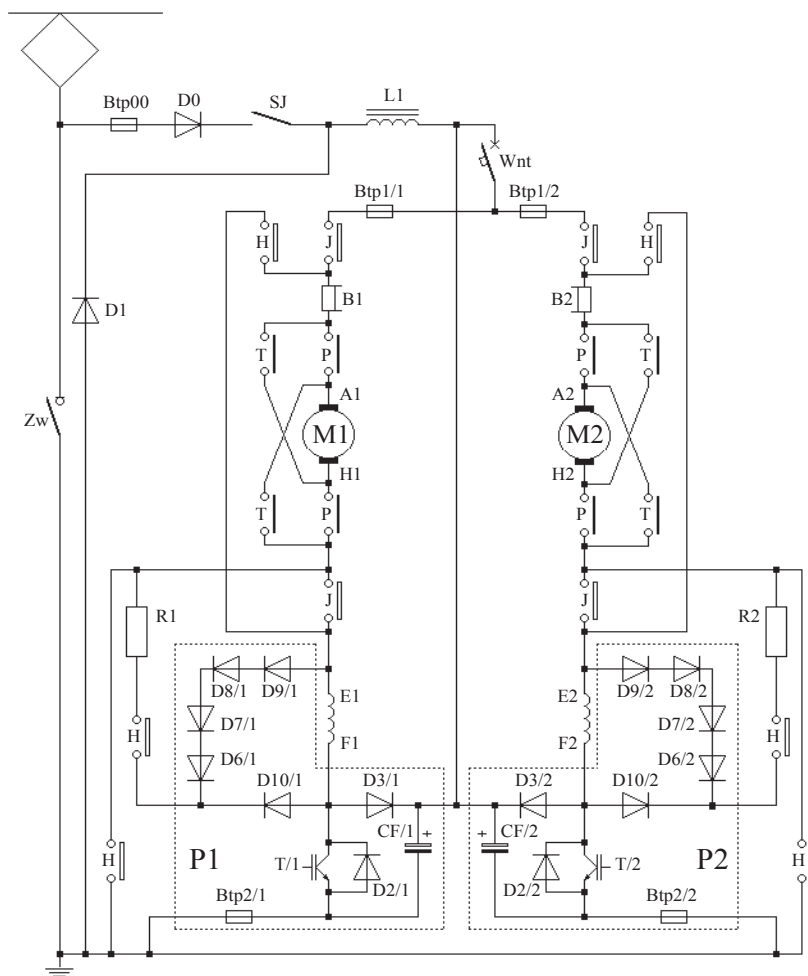
Kopalniana lokomotywa typu Ld 30 napędzana jest dwoma silnikami szeregowymi prądu stałego typu LD 055 o mocy 41,5 kW każdy. Lokomotywa zasilana jest z sieci trakcyjnej napięciem stałym 250 V. Rozruch i regulacja prędkości odbywają się poprzez zmianę wartości rezystancji w obwodzie silników z możliwością zmiany połączenia silników z szeregowego na równoległe.

W KANiUP AGH opracowano do lokomotyw Ld 30 układ sterowania z impulsowym przekształtnikiem

prądu stałego wykonanym z zastosowaniem modułów IPM. Przekształtnik zachowuje eksploatacyjne zalety przekształtników o komutacji szeregowej z tyrystorami SCR, wykorzystywanymi wcześniej w układach TUSDELK, stosowanymi również do modernizacji lokomotyw Ld 30, a więc zapewnia [6]:

- szeroki zakres regulacji napięcia wyjściowego niezależnie od parametrów i własności obciążenia, przy czym dolna granica tego zakresu może być dowolnie mała;
- możliwość pracy w charakterze łącznika statycznego;
- kształt napięcia wyjściowego w formie ciągu impulsów prostokątnych, których amplituda nie przekracza wartości napięcia zasilania.

Schemat obwodu głównego zmodernizowanej lokomotywy Ld 30 z modułami IPM przedstawiono na rys. 1. Zastosowany w układzie sterowania przekształtnik składa się z dwóch bloków (P1, P2 – rys. 1) o jednakowej strukturze i geometrii. Oprócz elementów półprzewodnikowych blok zawiera gałęzie wspomaganie komutacji (niepokazane na schemacie), bezpiecznik szybki Btp2 i baterię kondensatorów filtra sieciowego CF.



Rys. 1. Schemat obwodu głównego zmodernizowanej lokomotywy Ld 30 z modułami IPM [6]

Wybór kierunku jazdy lokomotywy uzyskiwany jest za pomocą styków P lub T nawrotnika, wybór stanu jazdy albo hamowania umożliwiają styki J i H walca głównego i hamulcowego nastawnika. Możliwa jest praca obu silników lub tylko jednego.

Energia z sieci trakcyjnej dostarczana jest do silników M1 i M2 oraz do kondensatorów filtra CF poprzez diodę D0, styk główny stycznika jazdy SJ oraz dławik filtra L1. Styk stycznika jazdy SJ jest otwierany w stanie hamowania, co ma uniemożliwić hamowanie odzyskowe napędu. Również dioda D0 zapobiega przekazywaniu energii do sieci trakcyjnej np. z kondensatora filtra CF.

Rozruch i regulację prędkości lokomotywy realizuje się poprzez zmianę średniej wartości napięcia podawanego na silniki za pomocą tranzystorów T/1 i T/2, pracujących ze stałą częstotliwością impulsowania równą 200 Hz. Impulsy bramkowe tranzystorów, a w konsekwencji także przebiegi wielkości elektrycznych obu silników, są przesunięte względem siebie o połowę okresu. Częstotliwość składowych zmiennych przebiegów prądu i napięcia filtra wejściowego oraz sieci trakcyjnej wynosi zatem 400 Hz.

Podstawowe układy elektronicznego sterownika układu TUSDELK, w tym układy regulacji, zostały wykonane z użyciem elementów analogowych. Wielkością zadawaną w stanie jazdy jest prędkość lokomotywy. Tak więc czas przewodzenia tranzystorów T/1 i T/2 zależy od wartości zadanej prędkości, ale także od sygnałów wypracowanych przez układ regulacji prądu silników i układ sterowania lokomotywą podczas przejazdu przez przerwy sekcyjne w sieci trakcyjnej.

Przejście od stanu jazdy do stanu hamowania dynamicznego (otwarcie styków J, zamknięcie styków H) odbywa się w stanie bezprądowym obwodu głównego. Przy prędkościach poniżej charakterystyki naturalnej siła hamowania regulowana jest poprzez zmianę prądów silników za pomocą tranzystorów T/1 i T/2, pracujących w charakterze modulatorów rezystancji R1 i R2. Przy dużych prędkościach uaktywnia się układ samoczynnego osłabiania pola wykorzystujący diody D6÷D10.

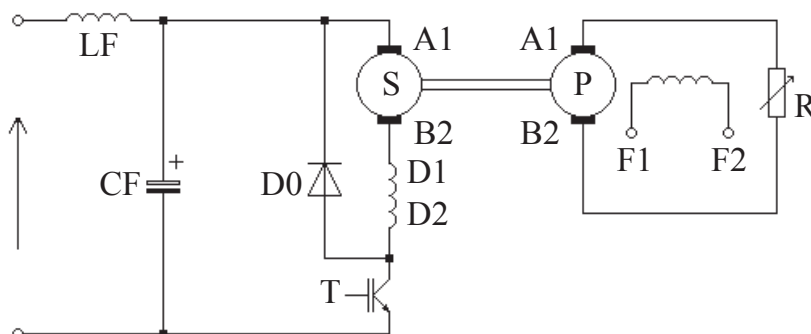
### 3. LABORATORYJNE STANOWISKO PRZEKSZTAŁNIKOWEGO NAPĘDU TRAKCYJNEGO ZE STEROWNIKIEM PLC

W Katedrze Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii AGH wykonano laboratoryjne stanowisko przekształtnikowego napędu trakcyjnego ze sterownikiem PLC.

Choć silniki szeregowe praktycznie nie są już stosowane we współcześnie produkowanych pojazdach trakcyjnych, to jednak prawie wszystkie lokomotywy elektryczne aktualnie eksploatowane w polskich kopalniach podziemnych napędzane są silnikami szeregowymi prądu stałego. Między innymi z tego powodu stanowisko laboratoryjne powstało na bazie układu TUSDELK lokomotywy Ld 30.

Celem budowy stanowiska było nie tylko sprawdzenie możliwości wykorzystania sterownika PLC do sterowania trakcyjnym napędem przekształtnikowym, ale także uzyskanie możliwości praktycznej weryfikacji wyników rozważań analitycznych i badań symulacyjnych stanów nieustalonych w napędzie, a w szczególności w filtrze wejściowym przekształtnika. Przy istniejącej tendencji do zwiększania częstotliwości pracy przekształtników (co pozwala na zmniejszenie wartości parametrów filtra wejściowego) zapewnienie poprawnej pracy filtra w stanach nieustalonych staje się równie ważnym kryterium doboru parametrów filtra, jak ograniczenie wartości tętnień prądu i napięcia w ustalonych stanach pracy [3].

Uproszczony schemat obwodu głównego stanowiska przedstawiono na rys. 2. Laboratoryjny układ napędu przekształtnikowego zasilany jest z trójfazowego dwupołkowego prostownika niesterowanego o wartości średniej napięcia wyjściowego 250 V. Takie warunki zasilania odpowiadają typowemu zasilaniu trakcji kopalnianej ze stacji APSP. Przewidziano również możliwość zasilania z przetwornicy wirującej (prądnica obcowzbudna). W tej wersji istnieje możliwość zasilania stanowiska napięciem o regulowanej wartości 0÷250 V.



Rys. 2. Schemat obwodu głównego stanowiska napędu trakcyjnego (opracowanie własne)

Jako przekształtnik zastosowano blok energoelektroniczny zmodernizowanej lokomotywy Ld 30. Tranzystor T (rys. 2) modułu PM300DSA060 (IC = 300 A, UCES = 600 V) pracuje ze stałą częstotliwością 200 Hz. Bateria kondensatorów filtra CF ma pojemność 10 mF, a indukcyjność dławika filtra LF wynosi 2 mH. Napięcie o regulowanej wartości średniej podawane jest na silnik trakcyjny S typu LDA 327a o mocy znamionowej 45 kW i prądzie znamionowym 205 A. Takie silniki wykorzystywane są do napędu górniczych lokomotyw Ld 31. Obciążeniem silnika jest maszyna obcowzbudna P, przekazująca energię na rezystancję R. Spośród wykorzystywanych elementów układu TUSDELK na schemacie z rys. 2. nie uwzględniono obwodów wspomaganie komutacji tranzystora, ochrony przeciążeniowej (wyzwalacz nadmiarowy, bezpieczniki szybkie), stycznika jazdy oraz styków nastawnika.

#### 4. UKŁAD STEROWANIA

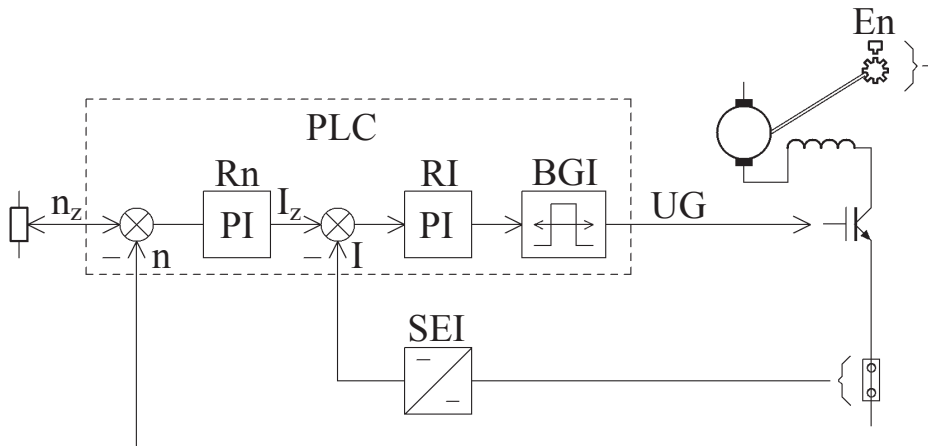
Do realizacji układu sterowania wykorzystano kompaktowy sterownik FX3U Mitsubishi. Jednostka centralna FX3U-16MT/ESS wyposażona jest w 8 wejść

i 8 wyjść cyfrowych oraz port RS 422. Dodatkowo, na potrzeby stanowiska, zastosowano moduł wejść sygnałów analogowych FX3U-4AD-ADP oraz płytkę FX-USB-BD z portem USB, służącym do komunikacji z programatorem (komputer PC). Niewykorzystywany port RS 422 może posłużyć do wizualizacji procesów z użyciem ekranu dotykowego.

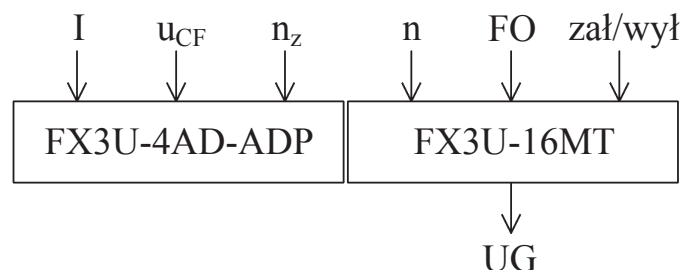
Sterownik FX3U należy do szybszych sterowników w swej klasie – czas realizacji operacji logicznej to 65 ns, a programowa funkcja regulatora PID może być wykonywana z minimalnym czasem próbkowania 1 ms.

Wykorzystane oprogramowanie narzędziowe GX Developer FX pozwala na tworzenie i edycję programów, symulację oraz monitorowanie wykonania programu z możliwością forsowania zmiennych. Program sterownika FX3U został zapisany w języku schematów drabinkowych (ladder diagram Mitsubishi) [7]. W zależności od wersji programu czas wykonania przez sterownik pojedynczego cyklu programowego wynosi około 1 ms, w tym 200  $\mu$ s to czas konwersji analog-cyfra modułu FX3U-4AD-ADP.

Uproszczony schemat funkcjonalny układu regulacji napędu trakcyjnego przedstawiono na rys. 3., zaś na rys. 4. pokazano przyporządkowanie najważniejszych sygnałów do sterownika.



Rys. 3. Uproszczony schemat funkcjonalny układu regulacji; struktury programowe sterownika PLC: Rn – regulator prędkości, RI – regulator prądu, BGI – blok generacji impulsów, En – enkoder, SEI – separator prądu (opracowanie własne)



Rys. 4. Sygnały sterownika (opracowanie własne)

Na wejścia cyfrowe jednostki centralnej FX3U-16MT wprowadzane są:

- sygnały od operatora (np. zał/wył – załącz/wyłącz);
- FO – sygnał błędu z modułu IPM;
- n – sygnał z enkodera (500 imp/obr) w postaci pojedynczego ciągu impulsów prostokątnych o częstotliwości zależnej od prędkości napędu. Sygnał z enkodera wprowadzany jest na wejście wykorzystywane jako wejście szybkiego licznika ( $f_{max} = 100 \text{ kHz}$ ).

Na wejścia sygnałów analogowych modułu FX3U-4AD-ADP wprowadzane są sygnały:

- $n_z$  – prędkość zadana;
- $u_{CF}$  – napięcie kondensatorów filtru;
- $I$  – prąd silnika.

Enkoder oraz wzmacniacze separujące SEI i SEN, z których pobierane są sygnały prądu silnika i napięcia kondensatorów filtru, są elementami obwodów sterowania układu TUSDELK. Napięcie wyjściowe wzmacniaczy separujących jest z zakresu 0÷10 V, zaś enkoder jest źródłem impulsów o amplitudzie 10 V.

Wyjścia cyfrowe jednostki centralnej FX3U-16MT wykorzystano do wyprowadzenia sygnału UG sterowania tranzystorem modułu IPM oraz do sygnalizacji. Sygnał UG o amplitudzie 5 V wprowadzany jest na wejście światłowodowego układu separacji galwanicznej sterownik PLC – moduł IPM.

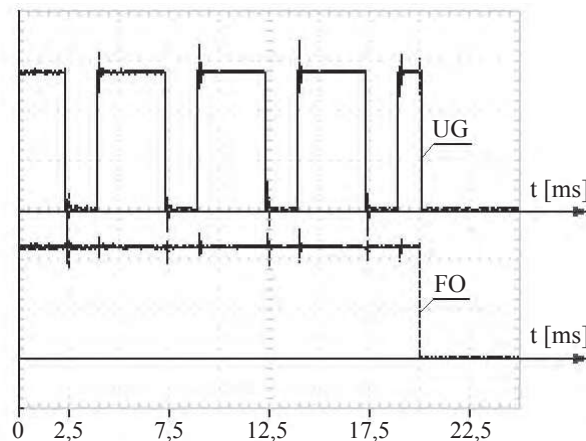
W zastosowanym sterowniku FX3U wejścia i wyjścia cyfrowe pracują w standardzie 0÷24 V DC, zaś na wejścia modułu FX3U-4AD-ADP mogą być wprowadzane sygnały z zakresu 0÷10 V DC. Wykonane układy dopasowania poziomów napięć, jak i układ sterowania tranzystora nie zostały uwzględnione na schemacie funkcjonalnym na rys. 3.

### 5. REAKCJA UKŁADU STEROWANIA NA SYGNAŁ BŁĘDU FO MODUŁU IPM

Inteligentny moduł mocy wyposażony jest w obwody zabezpieczeń, kontroli i sygnalizacji. Za pomocą sygnału FO moduł zgłasza stany awaryjne: przekroczenia dopuszczalnej temperatury (OT), obniżenia wartości napięcia zasilania obwodów sterowania (UV), przetężenia (OC) i zwarcia (SC) [1]. W przypadku dwóch ostatnich stanów sygnał FO jest aktywowany przez moduł IPM tylko na 1,8 ms, co stawia przed sterownikiem PLC wymóg odpowiednio szybkiego przerwania generacji impulsów sterujących tranzystorem IGBT modułu.

Sygnał FO wprowadzany jest na wejście jednostki centralnej FX3U-16MT (rys. 4) jako sygnał przerwa-

nia zewnętrznego. Reakcję sterownika na stan aktywowania sygnału FO w wyniku obniżenia napięcia zasilania obwodów sterowania przedstawiono na rys. 5. Widoczne jest praktycznie natychmiastowe skrócenie impulsu UG sterującego tranzystorem.



Rys. 5. Przebiegi sygnałów FO i UG modułu IPM (opracowanie własne)

### 6. REGULATORY PRĄDU I PRĘDKOŚCI

W układzie laboratoryjnym, wykorzystując do regulacji napędu sterownik PLC, utrzymano szeregowy układ regulatorów prędkości i prądu – jak w analogowym sterowniku układu TUSDELK. Zarówno w odniesieniu do regulatora prądu, jak i regulatora prędkości przyjęto strukturę typu PI, typową dla tego rodzaju napędu. Zaimplementowana w sterowniku FX3U programowa procedura w przypadku regulacji PID, po eliminacji części różniczkującej, realizuje funkcję regulatora PI według zależności [8]:

$$\Delta MV = K_P \left[ (EV_n - EV_{n-1}) + \frac{T_S}{T_I} EV_n \right] \quad (1)$$

$$EV_n = SV - PV_n \quad (2)$$

$$MV_n = \sum \Delta MV \quad (3)$$

gdzie:

- $EV_n$  – uchyb regulacji w chwili bieżącej,
- $EV_{n-1}$  – uchyb regulacji w chwili poprzedniej,
- $SV$  – wartość zadana,
- $PV_n$  – odpowiedź obiektu w chwili bieżącej,
- $K_P$  – współczynnik proporcjonalności,
- $T_S$  – czas próbkowania,
- $T_I$  – stała całkowania,
- $\Delta MV$  – przyrost sygnału sterującego,
- $MV_n$  – sygnał sterujący w chwili bieżącej.

### 6.1. Czasy próbkowania regulatorów

W prezentowanym układzie stanowiska laboratoryjnego tranzystor mocy T (rys. 2) jest impulsowany, analogicznie jak w układzie TUSDELK, ze stałą częstotliwością  $f_0$  równą 200 Hz ( $T_0 = 5$  ms).

#### Regulator prądu typu PI

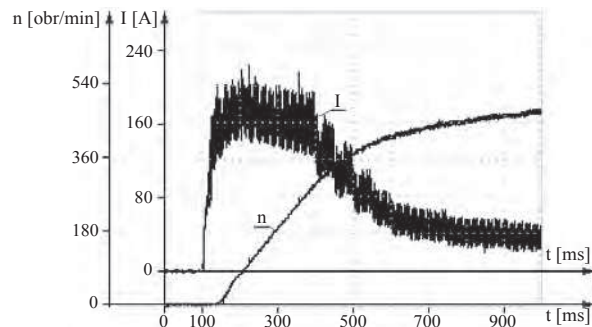
Elektromagnetyczną stałą czasową  $T_e$  silnika trakcyjnego lokomotywy kopalnianej można szacować na około 100 ms [5]. Pewne potwierdzenie tej wartości można uzyskać, wyznaczając stałą czasową w oparciu o rys. 6b (rezystancja silnika 0,12  $\Omega$ ). Proporcja stałej silnika  $T_e$  do okresu impulsowania  $T_0$  pozwala na przyjęcie czasu próbkowania regulatora prądu  $T_{SI}$  równego  $T_0$  (5 ms). Regulacja prądu i generacja impulsów sterujących tranzystora przekształtnika wykonywane są w sterowniku PLC w sposób programowy w przerwaniu od timera 5 ms, co zapewnia stałość czasów  $T_{SI}$  i  $T_0$ .

#### Regulator prędkości typu PI

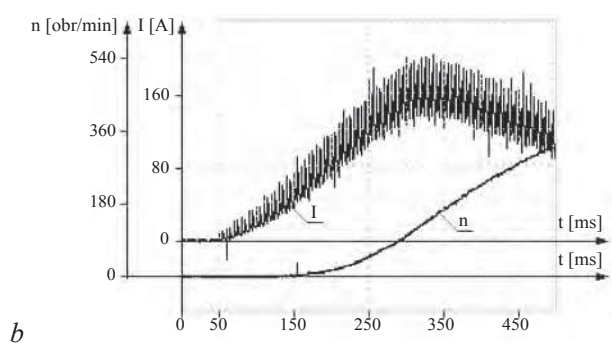
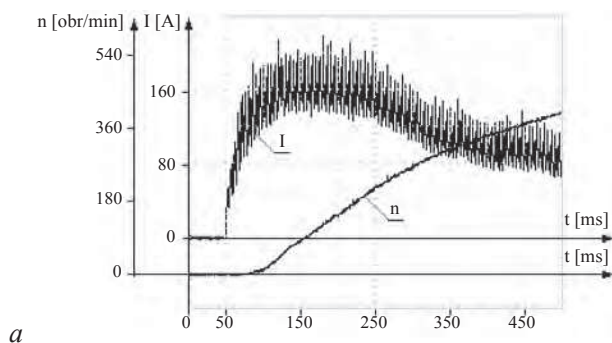
Przedstawiony na rys. 6. przebieg narastania prędkości nieobciążonego silnika, w odniesieniu do skokowo zadanej prędkości  $n_z = 500$  obr/min, pozwala oszacować stałą czasową  $T_{em}$  rozważanego napędu na około 0,5 s. Należy podkreślić, że w przypadku lokomotywy kopalnianej czy lokomotywy ze składem

stała ta będzie wielokrotnie większa. Przyjęcie czasu próbkowania regulatora prędkości  $T_{Sn}$  na poziomie 50 ms lub mniejszym jest więc uzasadnione.

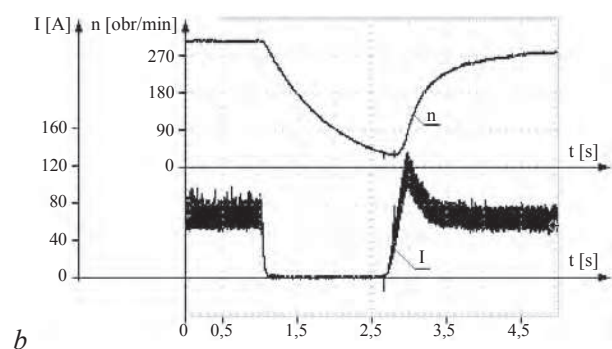
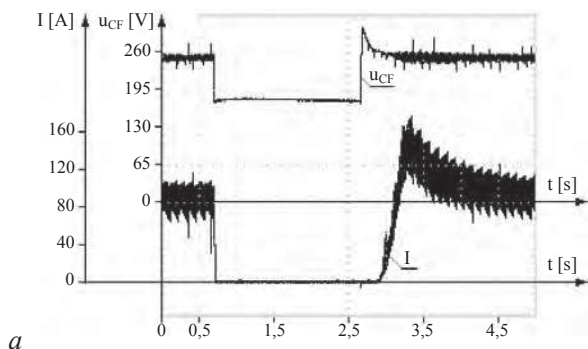
Prezentowane w artykule przebiegi prędkości napędu ze sterownikiem PLC uzyskano dla czasu próbkowania  $T_{Sn}$  regulatora prędkości 50 ms (rys. 6) oraz 20 ms (rys. 7 i 8b). Dla czasu próbkowania 50 ms w przebiegu prądu (rys. 6) są wyraźnie widoczne momenty zmiany prądu zadanego  $I_z$  – sygnału wyjściowego regulatora prędkości.



Rys. 6. Przebiegi prądu I oraz prędkości n silnika w odniesieniu do wybranych nastaw regulatorów typu PI; regulator prądu:  $K_{PI} = 0,4$ ,  $T_{II} = 200$  ms, regulator prędkości:  $K_{Pn} = 0,5$ ,  $T_{In} = 4$  s (opracowanie własne)



Rys. 7. Przebiegi prądu I oraz prędkości n silnika w układzie TUSDELK ze sterownikiem PLC; a – bez dodatkowego ograniczenia stromości narastania prądu silnika, b – z dodatkowym ograniczeniem stromości narastania prądu silnika (opracowanie własne)



Rys. 8. Przebiegi przy chwilowym zaniku napięcia zasilającego; a – przekształtnik tyrystorowy ze sterownikiem analogowym, przebiegi prądu silnika I oraz napięcia na kondensatorach filtra  $u_{CF}$ , b – przekształtnik z modulem IPM i sterownikiem PLC, przebiegi prądu I oraz prędkości n silnika (opracowanie własne)

Stosowany enkoder generuje 500 impulsów na obrót, co dla czasu pomiaru prędkości 50 ms zapewnia rozdzielczość 2,4 obr/min, a dla czasu 20 ms – 6 obr/min.

## 6.2. Dobór nastaw regulatorów

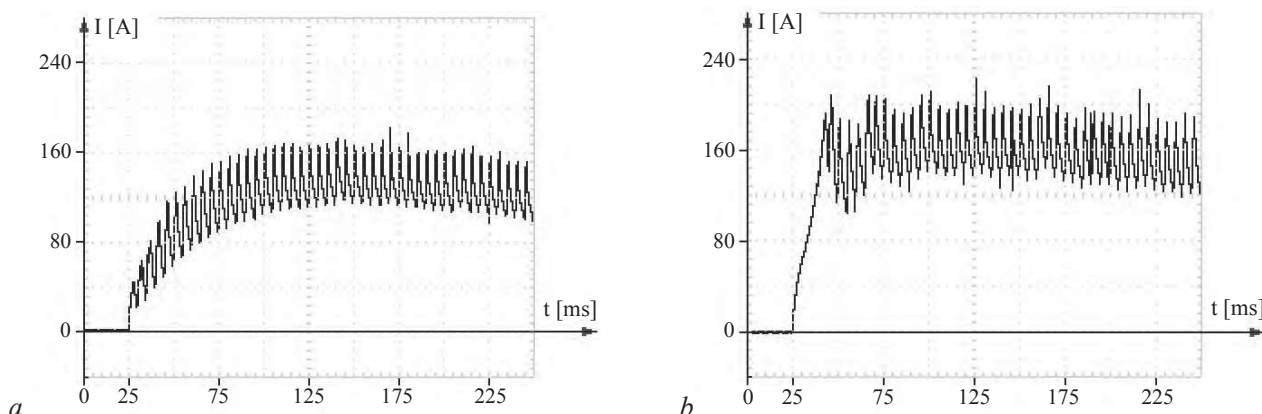
Specyfika silnika szeregowego – wartość prądu zwarcia wielokrotnie przekraczająca wartość prądu dopuszczalnego, możliwość rozbiegania silnika nieobciążonego, nieliniowa zmienność strumienia w funkcji prądu silnika – a dodatkowo impulsowy charakter zasilania powodują, że rozpoczynanie doboru nastaw regulatorów na stanowisku od razu w odniesieniu do znamionowych warunków zasilania maszyny jest ryzykowne ze względów bezpieczeństwa. Sytuację niewiele poprawia wcześniejsze, wstępne określenie wartości nastaw regulatorów w oparciu o analizę matematyczną układu lub symulację, a to ze względu na przyjęcie w opisie uprosz-

czeń wymuszonych złożonością zjawisk fizycznych zachodzących w układzie.

Prezentowane w artykule stanowisko laboratoryjne umożliwia „ręczny” dobór wartości parametrów regulatorów metodą kolejnych przybliżeń, jednym z dwóch sposobów:

- określenie nastaw napięcia zasilania obniżonego do wartości bezpiecznej i następnie stopniowe zwiększanie jego wartości, aż do znamionowej wraz z korygowaniem nastaw;
- rozpoczęcie doboru nastaw napięcia znamionowego, ale przy dołączonej w szereg z obwodem silnika regulowanej rezystancji.

Pierwszym etapem w doborze nastaw regulatorów było określenie parametrów regulatora prądu, przy początkowym przyjęciu regulatora typu P. Na rys. 9. przedstawiono zarejestrowane oscylograficznie przykładowe przebiegi prądu silnika, uzyskane w znamionowych warunkach zasilania, w fazie rozruchu przy skokowo zadanej wartości prądu 200 A.



Rys. 9. Przebiegi prądu silnika w odniesieniu do wybranych nastaw regulatora prądu typu P;  
a –  $K_{PI} = 0,3$ , b –  $K_{PI} = 0,7$  (opracowanie własne)

Przebiegi prędkości i prądu silnika dla dobranych parametrów regulatorów prądu i prędkości typu PI, przy skokowej zmianie prędkości zadanej od zera do 500 obr/min i przy programowym ograniczeniu prądu do wartości 200 A, przedstawiono na rys. 6.

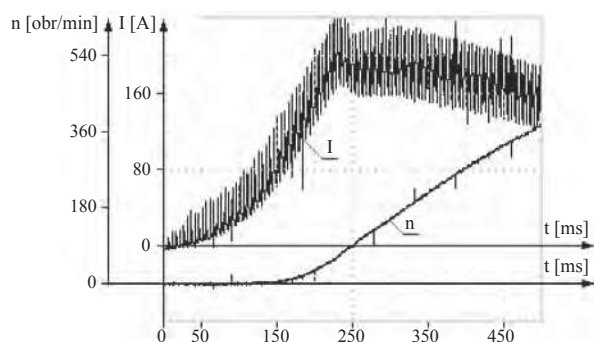
## 7. OGRANICZENIE STROMOŚCI NARASTANIA PRĄDU SILNIKA

Odejście w napędzie trakcyjnym od sterowania oporowego na rzecz wykorzystania przekształtników energoelektronicznych pozwoliło na ograniczenie stromości narastania (i wartości maksymalnej) prądu, a w konsekwencji – momentu silnika. Dzięki temu nastąpiło znaczne osłabienie szarpnięć

występujących głównie podczas rozruchu, a groźnych wykojeniem wozów czy uszkodzeniem sprzęgów. Uzyskano również zwiększenie trwałości elementów przeniesienia napędu. Na rys. 10. pokazano przebiegi prądu i prędkości silnika typu LDa 327a, zarejestrowane na stanowisku laboratoryjnym z układem TUSDELK lokomotywy Ld 31 wykorzystującym tyrystorowy przekształtnik i elektroniczny sterownik analogowy z regulatorami prądu i prędkości typu inercyjnego. Przebiegi uzyskano w przypadku skokowego zadania prędkości 500 obr/min.

Poprawna praca przekształtnika tyrystorowego wymaga zapewnienia właściwej sekwencji podawania impulsów zapłonowych na tyrystory (impulsy podawane są najpierw na tyrystor komutacyjny, a dopiero później na tyrystor główny), co wprowadza

dza dodatkowe opóźnienie w pojawieniu się prądu silnika. Rys. 10. nie obejmuje tego przedziału czasowego.



Rys. 10. Przebiegi prądu  $I$  oraz prędkości  $n$  silnika w tyrystorowym układzie TUSDELK ze sterownikiem analogowym (opracowanie własne)

Prezentowane w artykule stanowisko laboratoryjne z przekształtnikiem wykorzystującym moduł IPM i z silnikiem typu LDa 327a oraz ze sterownikiem PLC, realizującym na drodze programowej regulację prądu i prędkości, pozwoliło na uzyskanie przebiegów przedstawionych na rys. 7. Dla obu par przebiegów (rys. 7a i 7b) zachowano te same wartości parametrów regulatorów (regulator prądu:  $K_{PI} = 0,4$ ,  $T_{II} = 200$  ms, regulator prędkości:  $K_{Pn} = 0,5$ ,  $T_{In} = 4$  s), jednak przebiegi z rys. 7b zostały uzyskane po wprowadzeniu dodatkowego ograniczenia stromości narastania prądu silnika. Przebiegi uzyskano w odniesieniu do skokowego zadania prędkości 500 obr/min.

Przepisy górnicze nie zezwalają na pracę lokomotywy przy wartości napięcia w sieci trakcyjnej poniżej 175 V. Dlatego też w układach TUSDELK blokowana jest praca przekształtnika przy spadku napięcia na kondensatorach filtra wejściowego (CF – rys. 1) poniżej 175 V. Taka sytuacja ma również miejsce podczas przejazdu lokomotywy przez przerwę sekcijną. Po przejechaniu przerwy, wraz ze wzrostem napięcia na kondensatorach filtra, rozpoczyna się ponowne podawanie napięcia na silniki trakcyjne lokomotywy. Także w tej sytuacji, by zapobiec szarpnięciom, powinna być ograniczana stromość narastania prądu silnika.

Na rys. 8. przedstawiono zarejestrowane w laboratorium przebiegi w przypadku chwilowego wyłączenia zasilania stanowiska podczas pracy napędu. Rys. 8a uzyskano na stanowisku z układem TUSDELK lokomotywy Ld 31 (przekształtnik tyrystorowy i analogowy sterownik), a rys. 8b – na stanowisku z przekształtnikiem z modułem IPM i sterownikiem PLC. Rys. 8a zawiera przebiegi prądu silnika i napięcia na kondensatorach filtra, zaś rys. 8b – przebiegi prądu silnika i prędkości silnika. Przebiegi z rys. 8b

wskazują na prawidłową pracę napędu ze sterownikiem PLC również w przypadku chwilowego zaniku napięcia zasilania.

## 8. PODSUMOWANIE

Prezentowane w artykule wyniki prób laboratoryjnych potwierdzają możliwość wykorzystania sterownika PLC w układzie regulacji napędu trakcyjnego z przekształtnikiem impulsowym prądu stałego.

Elastyczność konfiguracyjna sterownika PLC oraz programowa łatwość modyfikacji wartości parametrów i realizowanych przez sterownik funkcji przyspieszają i ułatwiają zarówno weryfikację wyników rozważań teoretycznych, jak i uzyskanie oczekiwanych własności napędu.

### Literatura

1. *3rd Generation IGBT and intelligent power modules*, Application Manual, Mitsubishi, 1995
2. Broel-Plater B.: *Sterowniki programowalne. Właściwości i zasady stosowania*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2003.
3. Dudek R., Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Stany przejściowe w filtrach wejściowych napędów trakcyjnych sterowanych impulsowo przy pracy silnikowej i prądnicowej*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2008, nr 80, s. 113-118, BOBRME Komel, Katowice 2008.
4. Dudek R., Kosiorowski S., Stobiecki A., Żuchowicz M.: *Układ sterowania silników trakcyjnych zmodernizowanej lokomotywy kopalnianej LGT-22*, Materiały 6. Międzynarodowej Konferencji „Nowoczesna trakcja elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku – MET 2003”, Warszawa 25-27.09.2003.
5. Dudek W., Machowski J.: *Sieci trakcyjne w górnictwie*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1967.
6. Dudek R., Żuchowicz M.: *Układ sterowania elektrycznej lokomotywy kopalnianej z inteligentnymi modułami mocy*. „Czasopismo Techniczne, Elektrotechnika”, 1-E/2007, z. 5 (r. 104), Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.
7. *FX3U/FX3UC Podręcznik programowania – instrukcje podstawowe i użytkowe*, Mitsubishi, podręcznik nr JY997D16601.07.2005.
8. *FX3U/FX3UC User's Manual – Analog Control Edition*, Mitsubishi, podręcznik nr JY997D16701.07.2005.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.