

Algorytmy sterowania napędem elektrycznym w realizacjach aplikacyjnych z zastosowaniem współczesnej techniki falownikowej

dr inż. Mariusz Jabłoński
Katedra Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej

Artykuł opisuje zagadnienia dotyczące zastosowania falownikowej techniki napędowej w różnych branżach przemysłu. Przedstawiono przebiegi dotyczące różnych algorytmów sterowania. Omówiono zagadnienia zastosowania aplikacyjnego silników indukcyjnych oraz identyfikacji ich parametrów zastępczych z omówieniem ciekawych przykładów aplikacyjnych.

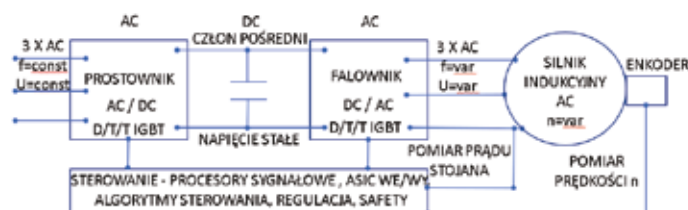
Wprowadzenie

Zautomatyzowane układy napędowe z falownikami napięciowymi i silnikami indukcyjnymi to aktualnie jedna z najbardziej rozwijających się dziedzin nauki i techniki. Jest ona interdyscyplinarna, bo związana z dziedzinami: maszyn elektrycznych, napędu elektrycznego, systemów sterowania, elektromechaniki, elektroniki i energoelektroniki przemysłowej [1]. Obecnie produkowanym układom napędowym, zależnie od ich miejsca przeznaczenia w projektowanej aplikacji oraz wartości mocy użytego silnika napędowego, stawia się wiele szczegółowych wymagań, jak np. energooszczędność.

Przeмиenniki częstotliwości

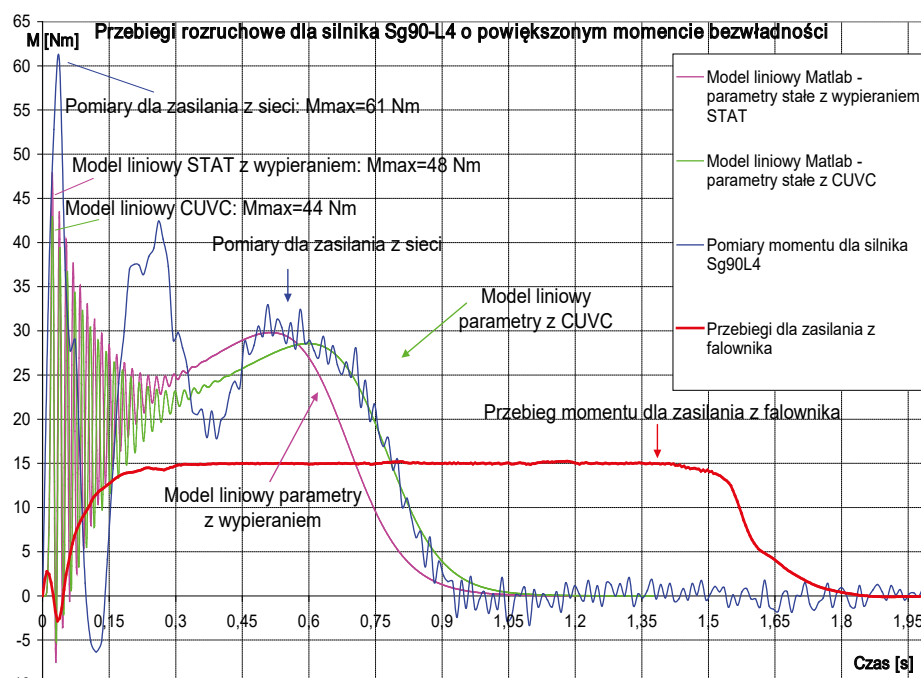
Dynamiczny rozwój elektroniki, a szczególnie mikroelektroniki, wywarł bardzo duży wpływ na współczesne realizacje praktyczne układów napędowych z cyfrową techniką sterowania. Poniżej, na rys. 1. przedstawiono trzyfazowy pośredni przeмиennik częstotliwości z falownikiem napięcia i członem pośrednim napięcia stałego oraz silnikiem indukcyjnym i pomiarem prądu stojana oraz prędkości obrotowej silnika.

Na rys. 1. przedstawiono ideę podwójnej zamiany energii w celu regulacji prędkości obrotowej podłączonego silnika. Do przeмиennika dostarczamy napięcie AC o parametrach: $U = \text{const}$ i $f = \text{const}$. Dzięki zamianie AC na DC oraz DC na AC otrzymujemy napięcie o parametrach $U = \text{var}$ i $f = \text{var}$, co umożliwia regulację prędkości obrotowej poprzez zmianę amplitudy i częstotliwości. Dla porównania, na rys. 2. zamiesz-



Rys. 1. Przeмиennik częstotliwości z falownikiem napięcia i członem pośrednim napięcia stałego oraz silnikiem indukcyjnym i pomiarem prądu i prędkości [1]

czono zestawienie charakterystyk rozruchowych silnika indukcyjnego zasilanego bezpośrednio z sieci trójfazowej, z silnikiem uruchamianym za pomocą przeмиennika częstotliwości.



Rys. 2. Przebiegi porównawcze momentu rozruchowego dla silnika indukcyjnego zasilanego bezpośrednio z sieci oraz zasilanego z przeмиennika: silnik Sg90L4 o mocy $P_N = 1,5 \text{ kW}$ [1]

Na rys. 2. widać wyraźnie charakterystyczne udary momentu (prądu) w przebiegach rozruchowych. Kolorem czerwonym zaznaczono przebieg momentu silnika sterowanego z falownika w zadanym czasie. Różnice są wyraźne, gdyż wynikają z różnic w układzie napędowym: sterowany i niesterowany. Podstawową funkcją napędu sterowanego/regulowanego jest kontrola przepływu energii z sieci do procesu, gdzie energia jest dostarczana do procesu przez wał silnika, a stan wału opisują zmienne wielkości: prędkość, moment i położenie. Regulacja przepływu energii narzuca konieczność kontroli tych zmiennych, czyli zamianę energii elektrycznej

w mechaniczną z regulacją prędkości obrotowej (np. aplikacje standardowe z silnikami indukcyjnymi) lub regulacją położenia wału (np. aplikacje z silnikami synchronicznymi serwo z magnesami trwałymi). Ważne są również takie cechy i parametry jak: ustalenie stanu elektromagnetycznego silnika, a szczególnie minimalizacja czasu trwania procesów przejściowych przy zmianach wartości zadanej, sterowanie strumieniem i momentem elektromagnetycznym silnika oraz minimalizacja uchybu regulacji dla zastosowanych regulatorów PI prądu, napięcia, momentu i pozycji. Planowane maksymalne wykorzystanie cech zastosowanego silnika do danej aplikacji powinno zachodzić przy jednoczesnym ograniczeniu takich wielkości jak prąd, moment czy temperatura oraz powinno zapewniać dużą niezawodność pracy w zespole napędowym (moment bezwładności, moment krytyczny, łóżyskowanie, chłodzenie).

Algorytmy sterowania falownikami napięcia

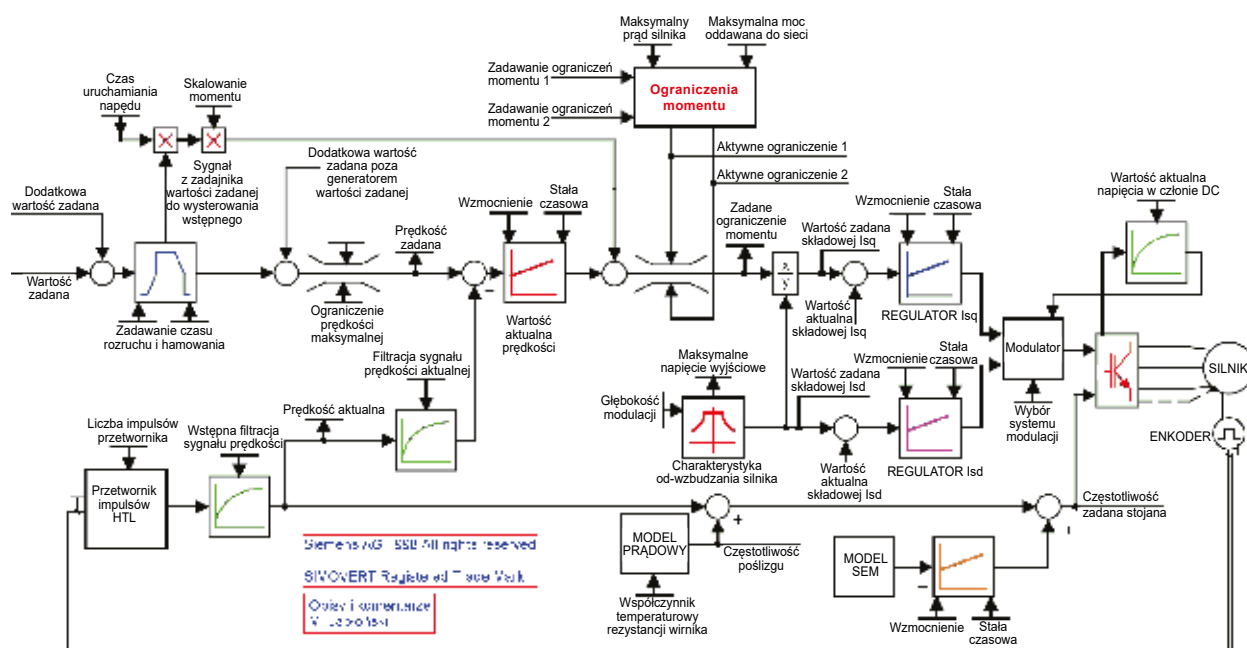
W realizacji powyższych założeń może pomóc dobrze dobrany i oprogramowany algorytm sterowania, czyli uwzględnienie wzajemnych oddziaływań układu sterowania falownikiem i cech zastosowanego silnika, gdzie przełączenia kluczy w falowniku będą związane ze stanem elektromagnetycznym silnika (ustalenie optymalnych przełączeń trwa około kilkudziesięciu mikrosekund). Szczególną uwagę należy zwrócić na nowe rozwiązania dotyczące technik regulacji połowo-zorientowanej, której różne odmiany stosuje się powszechnie do silników indukcyjnych, szczególnie w napędach indywidualnych (np. bezczujnikowe sterowanie połowo-zorientowane). Przy tego rodzaju regulacji dynamika napędu z silnikiem indukcyjnym staje się porównywalna z dynamiką napędu prądu stałego, co jest możliwe dzięki implementacji równań stanu opisujących napęd elektryczny z silnikiem indukcyjnym do algorytmu sterowania. Przykład układu napędowego realizującego połowo-zorientowaną regulację częstotliwości bez czujnika prędkości przedstawia rys. 3. Zaimplementowana technika cyfrowa pozwala na monitorowanie i analizę wszystkich bloków i parametrów funkcyjnych [1]. Dostarczone przez producenta oprogramowanie pozwala na bieżąco monitorować parametry, ich zmiany oraz obserwować, analizować i rejestrować cały

proces regulacji. Dzięki wbudowanemu modułowi możliwa jest rejestracja rozruchów, zatrzymań oraz wielogodzinnych cykli produkcyjnych. Znajomość narzędzia i dostęp do obiektu przemysłowego pozwala badaczowi na bezpośrednią weryfikację, wnioskowanie, decyzyjność i możliwość podjęcia działań zapobiegawczych, oczywiście za zgodą i pod nadzorem stosownych służb.

W pętli regulacji układu z rys. 2. prąd silnika mierzony jest w dwóch fazach oraz mierzone jest napięcie stałe obwodu pośredniczącego. Następnie zmierzone wartości są dostarczane do zastępczego modelu silnika, gdzie na bazie parametrów zastępczych odbywa się pomiar lub estymacja wielkości potrzebnych do sterowania silnika. W procesie regulacji, na podstawie obliczeń modelu silnika i jego parametrów zastępczych oraz pośredniego pomiaru strumienia stojana i momentu silnika, wyznaczane są kolejności przełączania kluczy tranzystorowych IGBT modułu mocy. Natomiast wybrany stan łączników wymusza wymagane parametry do regulacji strumienia stojana oraz poziomu momentu silnika. W zależności od zastosowanego procesora sygnałowego, w cyklu kilkudziesięciu mikrosekund, następuje porównanie aktualnie dostarczonych wartości do komparatorów z sygnałami zadanymi strumienia i momentu. Na podstawie tego porównania generowana jest informacja do układu sterującego przełącznika impulsów optymalnych. Procesor sygnałowy wraz z układem sterującym realizuje przełączenia kluczy falownika. Dla każdego cyklu sterowania wyznaczony jest właściwy dobór przełączeń, a podstawą działania omawianej techniki sterowania jest duża szybkość przełączania impulsów.

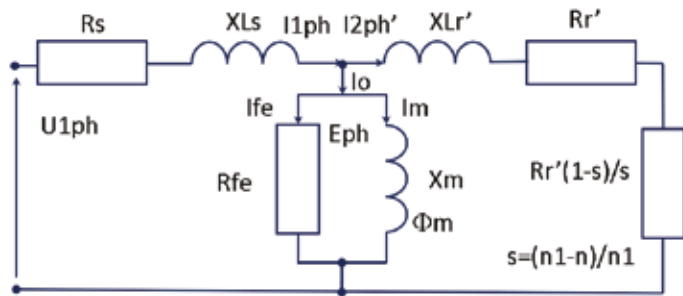
Schemat zastępczy silnika w algorytmie falownika

Uaktualnienie parametrów silnika kilkadziesiąt tysięcy razy na sekundę umożliwia szybką reakcję silnika na wartość momentu na wale. Podczas procesu uruchomieniowego dostarcza się podstawowe dane dotyczące zastosowanego silnika – tabliczka znamionowa. Podczas procedury uruchomienia w „biegu identyfikacyjnym” wyznaczane są parametry: rezystancja stojana, indukcyjności i prąd magnesujący [1]. Przyjęty model silnika jest tutaj kluczem do zastosowania techniki sterowania połowo-



Rys. 3. Schemat funkcjonowania wektorowego algorytmu sterowania na przykładzie przemiennika Siemens SIMOVERT MasterDrives Vector Control z czujnikiem prędkości [4, 5]

-zorientowanego. W powyższym rozwiązaniu silnik reprezentowany jest jako model o parametrach skupionych (rys. 4).



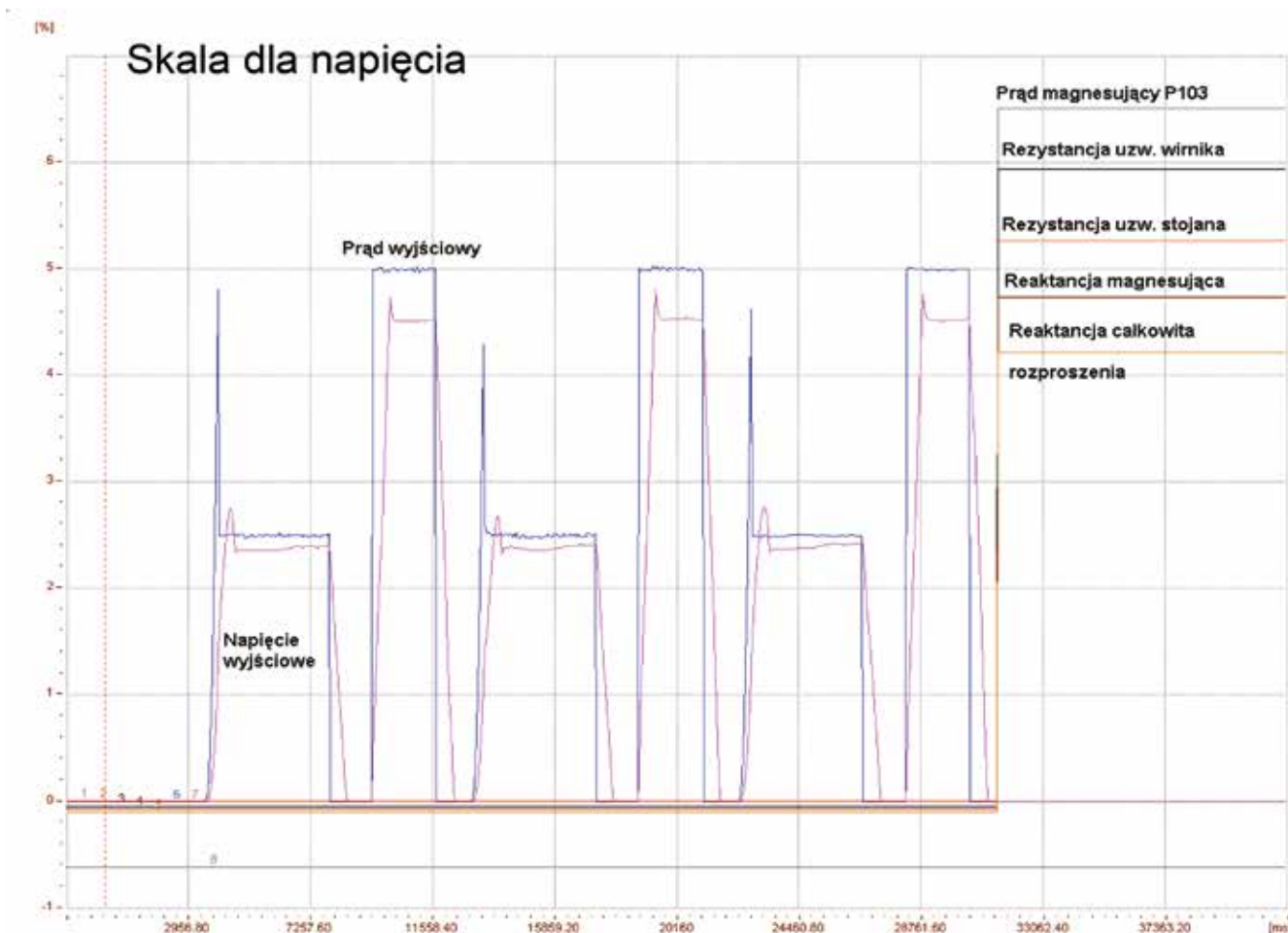
Rys. 4. Schemat zastępczy typu T silnika indukcyjnego zaimplementowany w wektorowym algorytmie sterowania układem falownikowym w zespole napędowym [1]

Fundamentalne znaczenie ma tutaj działanie powyższego modelu dla różnych stanów pracy oraz tworzenie wykresu wskazowego maszyny indukcyjnej dla zrozumienia zasady działania układu napędowego. Dla przypomnienia, w stanie rozruchu, dla $n = 0$, poślizg $s = 1$, co oznacza, że człon $Rr'(1-s)/s = 0$, co oznacza zwarcie. Prąd podczas pracy modelu płynie gałęzią podłużną poprzez elementy R_s , X_{Ls} , $X_{Lr'}$ i $R_{r'}$, co pozwala na ich wyznaczenie przy metodzie odpowiedzi prądowej na zadany skok napięcia stałego. W stanie pracy jałowej, kiedy n dąży do n_1 , a poślizg s dąży do zera, to człon $Rr'(1-s)/s$ dąży do nieskończoności, co oznacza rozwartą gałąź tego obwodu. Prąd po przyłożeniu napięcia popłynie głównie gałęzią poprzeczną, co pozwoli na wyznaczenie parametrów: I_m i X_m oraz F_m . Część R_{fe} jest bardzo duża w odniesieniu do pozostałych parametrów i dlatego jest pomijana. Prąd magnesujący I_m stanowi istotny parametr

dla poprawnego funkcjonowania przemiennika parametryzowanego do współpracy z silnikiem indukcyjnym.

Identyfikacja parametrów zastępczych silnika w modelu falownika

Kłopotliwe może być wyznaczenie parametrów zastępczych silnika, przedstawionych na rys. 4. Nie dostarcza ich również żaden producent. Poza tym, silnik indukcyjny, z uwagi na budowę, jest obiektem silnie nieliniowym. Trudno jest zatem znaleźć dla tego samego typoszeręgu i oznaczenia dwa silniki indukcyjne o identycznych parametrach zastępczych. Również wymiana uszkodzonego silnika w aplikacji z przemiennikiem dla sterowania wektorowego narzuca konieczność znajomości parametrów schematu zastępczego. Jak zatem wyznaczyć takie parametry? We współczesnych układach przemiennikowych producent urządzenia dostarcza wbudowane procedury identyfikacji parametrów przyłączanych do przekształtnika silników indukcyjnych. Najczęściej identyfikacja jest możliwa w stanie zatrzymanym (bez rozprzegania wału) oraz w stanie ruchomego wirnika. Próby są zbliżone do analogicznych, jakie wykonuje się dla maszyn indukcyjnych: próba zwarcia, próba stanu jałowego i próba obciążenia. Przed uruchomieniem procedury należy dokładnie rozpoznać układ napędowy (specyfikę maszyny, przekształtnik, silnik, mechanikę, obciążenie, nastawy krytyczne, ograniczenia statyczne i dynamiczne). Do systemu sterowania pracą wybranego algorytmu, w postaci parametru, należy wprowadzić dane znamionowe przekształtnika i silnika, a następnie należy wykonać stosowną parametryzację, której elementarną częścią jest identyfikacja. W trakcie identyfikacji, na bazie zaimplementowanych



Rys. 5. Identyfikacja parametrów modelu zastępczego silnika w stanie nieruchomego wirnika – silnik Sg90L4 o mocy $P_n = 1,5$ kW, nastawa prądu magnesującego $I_m = 0\%$ [1]

zaawansowanych metod, realizowana jest procedura wyznaczania zarejestrowanych wielkości, które są odpowiedzią na zadane wymuszenie. Do dyspozycji użytkownika są również nowoczesne metody optymalizacji nastaw parametrów regulatorów, które są identyfikowane na podstawie wyników pomiarów testujących w trakcie identyfikacyjnego biegu uruchomieniowego. Na rys. 5. przedstawiono sposób realizacji identyfikacji w stanie zatrzymanego wirnika – warunek wykonania próby, prędkość wirnika = 0.

Parametry zarejestrowane za pomocą urządzeń SIMOVERT firmy Siemens na różnych obiektach przemysłowych przedstawiono w tabeli nr 1.

Tabela 1. Zestawienie parametrów silników indukcyjnych wyznaczonych przy użyciu opisanego algorytmu [1]

Typ silnika	Sf132M4	Svg315S4	mSvg355M4	S6h560L4
Moc [kW]	7,5	110	250	1250
Napięcie [V]	380	380	380	690
Rs [Ω]	1,8420	0,0416	0,0104	0,0060
Rr' [Ω]	1,3350	0,0187	0,0135	0,0040
Lm [H]	0,2389	0,0300	0,0198	0,0069
Ls [H]	0,2463	0,0313	0,0203	0,0071
Lr' [H]	0,2530	0,0313	0,0208	0,0072

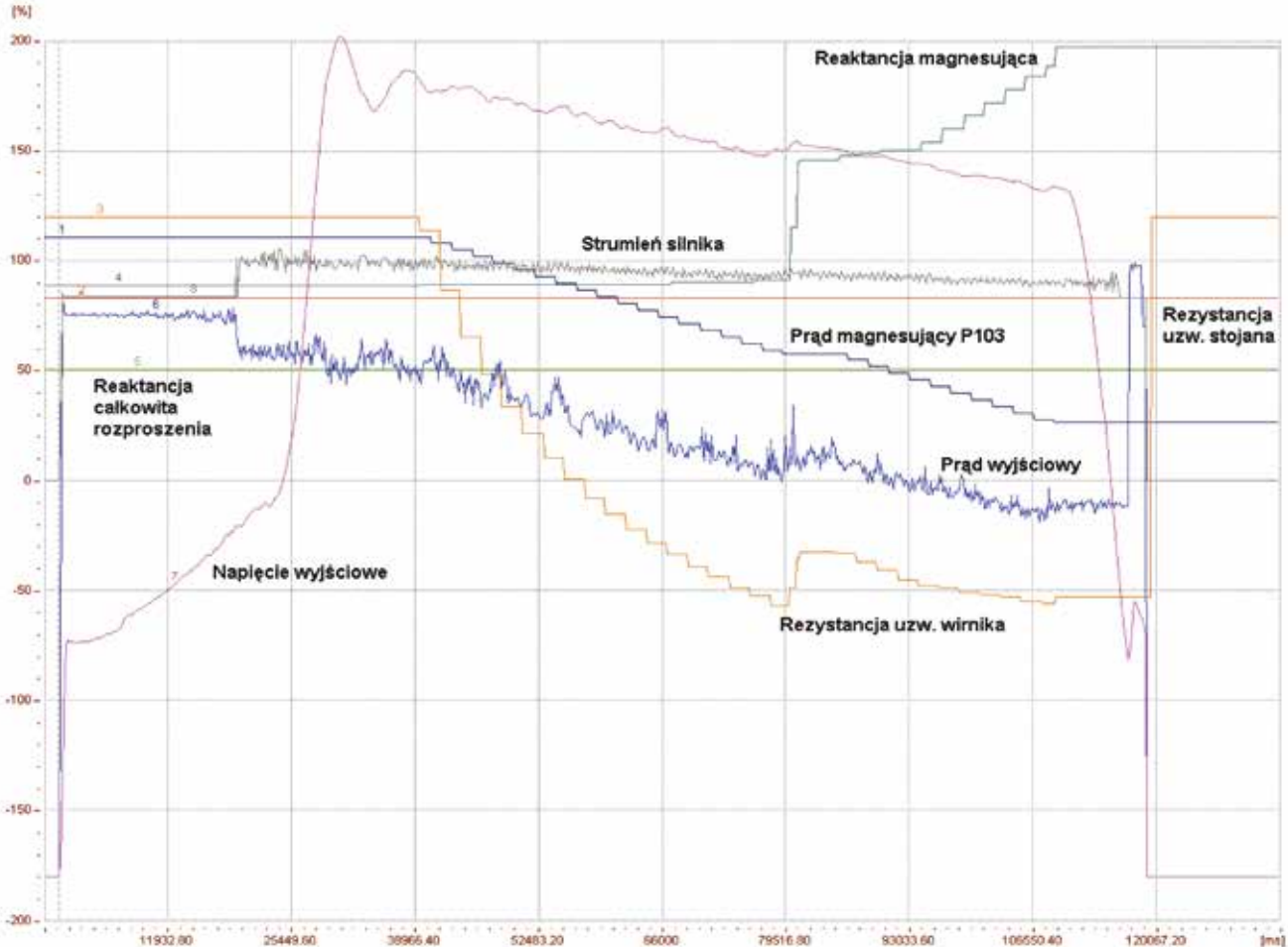
Przy realizacji procedur identyfikacji bardzo ważne są przyjęte nastawy początkowe. Mają one istotny wpływ (co dokładnie zbadano w pracy [1]) na czas realizacji pomiarów, charakter procesu identyfikacji oraz na uzyskane wyniki pomiarów. Na rys. 6. zamieszczono przebiegi zarejestrowane podczas identyfikacji parametrów silnika Sg90L4 dla

wektorowego, bezczujnikowego (bez czujnika prędkości) algorytmu sterowania silnikiem z celowo wstępnie wprowadzoną błędnie nastawą prądu magnesującego wynoszącą $I_m = 95\%$.

Próba trwała dwukrotnie dłużej, a uzyskane parametry zastępcze różniły się w granicach do 10% od parametrów uzyskanych przy nastawach domyślnych. Pozostawienie w pamięci przemiennika parametrów otrzymanych po identyfikacji, bez inżynierskiej weryfikacji, może prowadzić do niewłaściwej parametryzacji zespołu napędowego i problemów z drganiami powodującymi zagrożenia oraz szybsze zużywanie się elementów mechanicznych, a także nie uzyskaniem zakładanej dokładności regulacji. Z tego względu należy bacznie zwracać uwagę na uzasadniony fizyczną stroną proces dobór nastaw parametrów funkcyjnych napędów oraz poprawną identyfikację parametrów schematu zastępczego silnika, który funkcjonuje w algorytmie sterowania rzeczywistego obiektu. W wielu przypadkach wymagana jest wiedza z dziedziny maszyn elektrycznych i napędu elektrycznego. Automatyka w układzie regulacji nie poradzi sobie z osiągnięciem wymaganego punktu pracy, jeśli wprowadzimy niewłaściwe dane modelu silnika.

Sterowanie polowo-zorientowane

Na stronie 6. przedstawiono sposób opisu równań silnika indukcyjnego, który zamienia silnik indukcyjny w maszynę bardzo podobną do silnika prądu stałego, w którym prąd I_m jako składowa I_{sd} prądu stojana odpowiada za generację strumienia silnika, a składowa prądu stojana I_{sq} reprezentuje moment (prąd twornika dla maszyny DC). Schemat blokowy maszyny asynchronicznej zasilanej przez przemiennik z regulacją prądu stojana buduje się na podstawie układu równań wektorowych zapisanych w układzie współrzędnych d i q wirującym z prędkością synchroniczną ω_s



Rys. 6. Przebiegi otrzymane podczas identyfikacji parametrów silnika 1,5 kW w stanie bez obciążenia dla sterowania wektorowego z wstępnie błędnie ustawionymi parametrami [1]

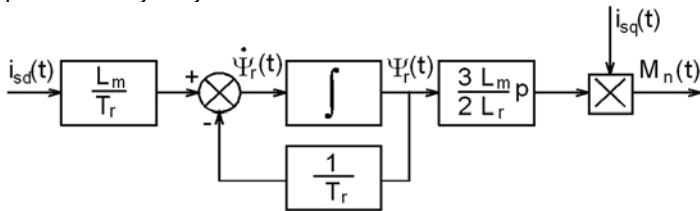
współbieżnie z wektorem strumienia Ψ_r . Przy zasilaniu przez przemiennik z regulacją prądu, równania napięcia stojana można pominąć, [1].

$$\frac{d\mathbf{\Psi}_r(t)}{dt} = -\frac{\mathbf{\Psi}_r(t)}{T_r} + \frac{\mathbf{I}_s(t) \cdot \mathbf{L}_m}{T_r} - j(\omega_s - \omega(t)) \cdot \mathbf{\Psi}_r(t) \quad (1)$$

Pozostają one ważne, lecz nie są istotne przy tworzeniu schematu blokowego maszyny. Po wykonaniu stosownych podstawień oraz uwzględnieniu braku zasilania po stronie wirnika, otrzymujemy równanie stanu w postaci wektorowej dla maszyny indukcyjnej klatkowej. Z kolei uwzględniając fakt pokrywania się osi d z wektorem strumienia Ψ , przyjmujemy, że składowa równa jest zeru. Stąd otrzymujemy:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_r(t)}{dt} &= \frac{d\Psi_{rd}(t)}{dt} = -\frac{\Psi_{rd}(t)}{T_r} + \frac{i_{sd}(t) \cdot L_m}{T_r} \\ M(t) &= \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot [\Psi_{rd}(t) \cdot i_{sq}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Blokowym odpowiednikiem powyższych równań jest schemat przedstawiony na rys. 7.



Rys. 7. Schemat blokowy maszyny indukcyjnej 3-fazowej dla celów sterowania polowo-zorientowanego [2]

Przedstawiony na rys. 7. schemat blokowy, podany po raz pierwszy w pracy [2], ma również istotne wady:

- zależność pomiędzy polowo-zorientowanymi składowymi prądu stojana I_{sd} i I_{sq} a wielkościami wyjściowymi przemiennika częstotliwości: amplitudą prądu I_s oraz częstotliwością napięcia stojana f_s nie ma ścisłego zapisu matematycznego;

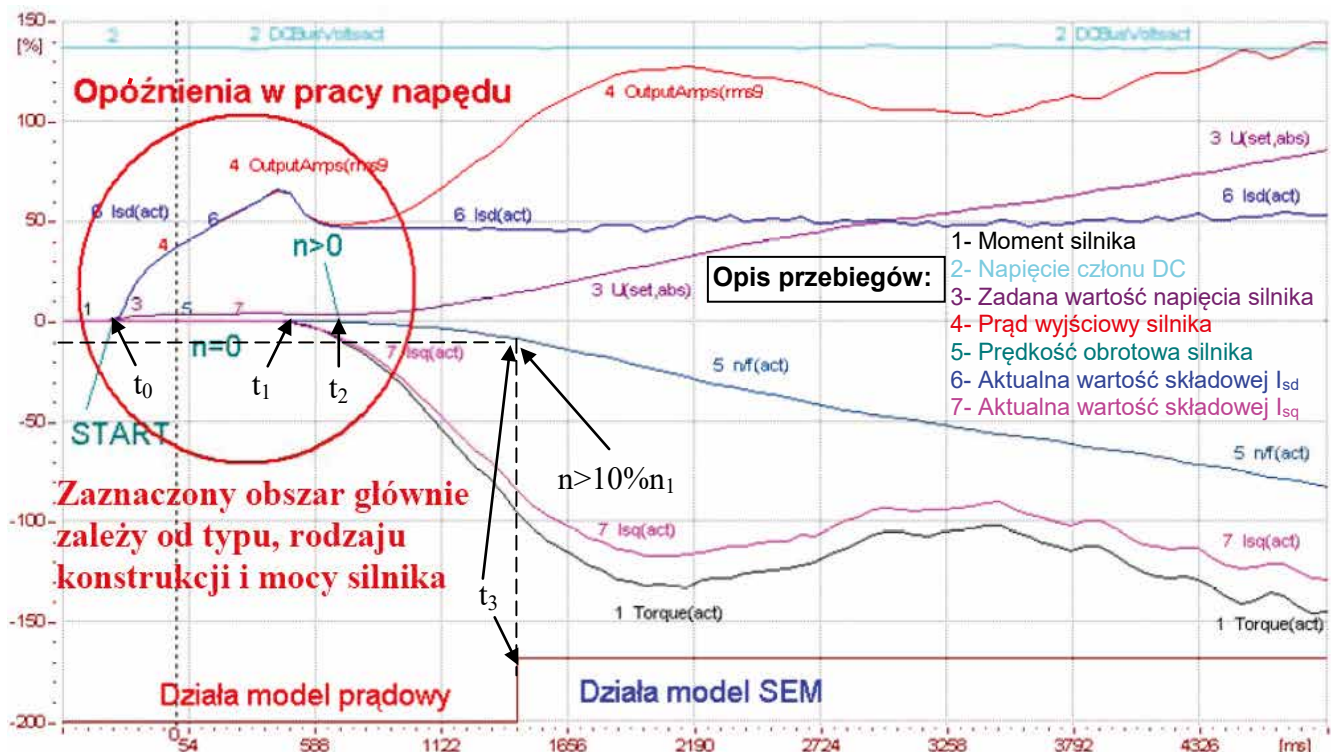
- częstotliwość poślizgu wirnika $f_r(\omega_r)$, która stanowi ważną wielkość używaną w klasycznej teorii maszyny asynchronicznej jako wielkość nastawczą w prostszych metodach sterowania, w tym przypadku nie występuje bezpośrednio. Pulsacja poślizgu $\square_r$ może być obliczona z uwzględnieniem składowych d i q według następującego równania [3]:

$$\omega_r = \frac{i_{sq}(t) \cdot L_m}{T_r \cdot \Psi_{rd}(t)} \quad (3)$$

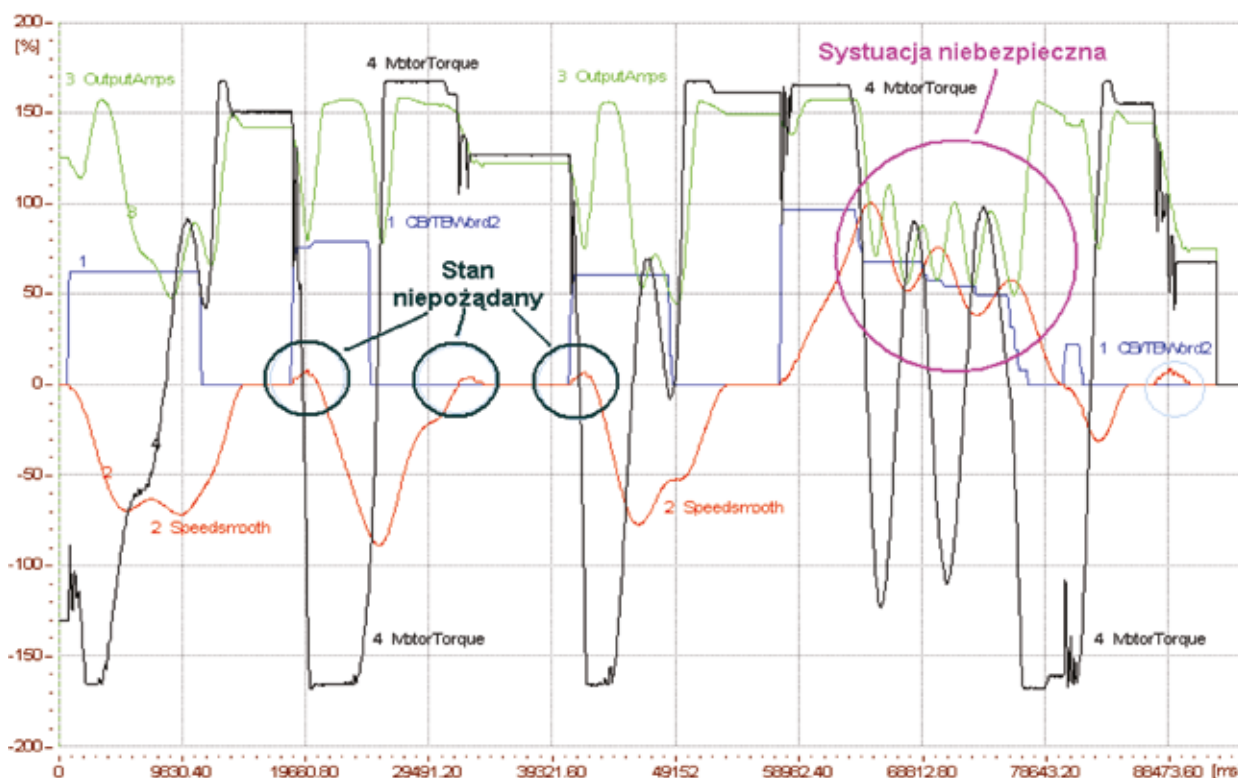
Natomiast relacje pomiędzy wielkościami wyjściowymi przemiennika częstotliwości a polowo-zorientowanymi składowymi I_{sd} i I_{sq} można wyznaczyć, jeżeli mamy informację o położeniu kątowym wektora strumienia (kąt ρ). Opisany model wymaga kontroli kątów fazowych w maszynie do celu synchronizacji impulsów sterujących częstotliwością przemiennika z przebiegiem wirującego strumienia. Synchronizacja ta może być realizowana różnie, zależnie od tego, jakie wielkości są bezpośrednio mierzone w maszynie i jakie są wymagania odnośnie do właściwości dynamicznych i statycznych napędu. Zagadnienia powyższe zostały również szeroko opisane w pracy [3].

Elektromagnetyczne procesy przejściowe w napędach falownikowych z silnikami indukcyjnymi

W przypadku napędów przemysłowych ciągła zmiana stanu (rozruchy, hamowanie, zmiana obciążenia, zmiana wartości zadanej) jest elementem nieodłącznym ich pracy. Jednak bardzo ważnym elementem, który ma decydujący wpływ na pracę układu i zapewnienie wymaganej dynamiki jest konieczność regulacji wymaganych wielkości (prąd, prędkość) w pierwszych chwilach po załączeniu napędu do pracy. Na rys. 8., na podstawie pomiarów testujących przeprowadzonych w aplikacji przemysłowej dla silnika o mocy $P_N = 37$ kW zaprezentowano przebieg procesu rozruchowego z opisem poszczególnych etapów: sygnał start, generacja



Rys. 8. Charakterystyki rozruchowe silnika indukcyjnego o mocy PN = 37 kW, pracującego w konfiguracji algorytmu wektorowego ze sprzężeniem zwrotnym prędkościowym [1]



Rys. 9. Przebiegi dynamiczne podczas cyklu pracy dźwigowej – silnik CSKg o mocy $P_N = 37 \text{ kW}$ [1]

składowej I_{sd} , generacja składowej I_{sq} , rozruch po rampie. Widać wyraźnie, że proces ustalania się stanu elektromagnetycznego silnika trwa około $\Delta t_w = 0,9 \text{ s}$ (jest to czas Δt_w liczony od podania sygnału „start” do chwili pojawienia się prędkości $n > 0$; $\Delta t_w = t_2 - t_0$). W pierwszej chwili rozruchu dla czasu t_0 i po podaniu sygnału „start”, pojawia się jedynie składowa I_{sd} prądu stojana (charakterystyka nr 6), natomiast składowa I_{sq} prądu stojana (charakterystyka nr 7) pojawi się w chwili t_1 , gdy wartość składowej I_{sd} zaczyna się ustalać na poziomie wynikającym z wartości prądu magnesującego (ustalone wzbudzenie, określone nastawą parametru!). W pierwszych chwilach na zaciski silnika jest podawane bardzo małe napięcie (charakterystyka nr 3), które wzbudza odpowiedni strumień. Dopiero w chwili t_1 , gdy strumień jest już ustalony, następuje generacja momentu (charakterystyka nr 1), który jest iloczynem wektorowym obu składowych. Dopiero wówczas rozpoczyna się etap rozruchowy.

Pożądane jest, aby w chwili pojawiania się składowej I_{sq} prądu stojana wartość strumienia, a tym samym wartość składowej I_{sd} była już ustalona (chwila t_1). Ten fakt zapewnia ustalony stan elektromagnetyczny w silniku i pozwala na regulację momentu elektromagnetycznego silnika poprzez sterowanie jedynie wartością składowej I_{sq} (charakterystyka nr 1). Występujące przeregulowanie w przebiegu składowej I_{sd} pozwala na ustalenie się wartości strumienia na wymaganym poziomie (nastawa pre-definiowana parametrem).

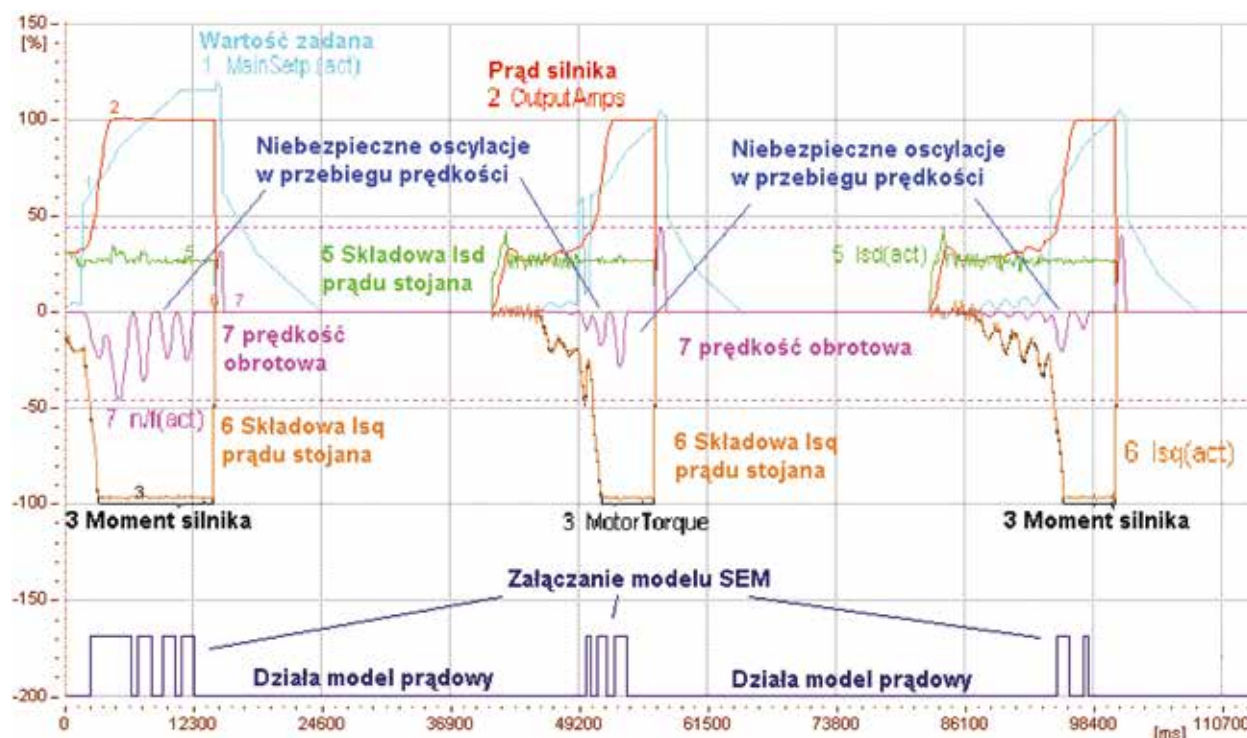
Z analizy poszczególnych bloków funkcyjnych wybranego algorytmu sterowania zauważamy, że istnieje możliwość zmiany nastawy „czasu wzbudzenia” generacji składowej I_{sd} , a przy tym skrócenia czasów opóźnień, a także przyspieszenia reakcji silnika po załączeniu przekształtnika. Implementacja funkcjonalności musi być dostosowana do charakteru aplikacji i zweryfikowana doświadczalnie na obiekcie (rys. 9. i 10.). Na zamieszczonych przebiegach wyraźnie widać pojawiające się w trakcie pracy urządzenia oscylacje w przebiegach prądu, momentu i prędkości. Jest to sytuacja niebezpieczna i niedopuszczalna z uwagi na możliwość powstawania drgań, pękania konstrukcji i zagrożeń dla obsługi.

Na rys. 10. (str. 8.), przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas typowego cyklu roboczego aplikacji dotyczącej napędów jazdy maszyny górnictwa odkrywkowego – zwalówki ZGOT. Zauważamy,

że występują ciągle zmiany poziomu wartości zadanej, co wymusza konieczność nieustannych przełączeń pomiędzy modelami zastępczymi silnika indukcyjnego w zastosowanym bezczujnikowym algorytmie sterowania. Zauważamy także powstawanie charakterystycznych oscylacji w przebiegach prędkości, które są szczególnie niebezpieczne dla układu mechanicznego. Zagadnienia dotyczące właściwego doboru algorytmu do aplikacji, parametryzacji oraz weryfikacji zastępczych modeli [4, 5] zastosowanego silnika wraz z zakresem działania (model prądowy, model SEM), ukazują się jako zagadnienia podstawowe [1].

Podsumowanie

- Współczesna automatyka przemysłowa oferuje wiele pomocnych, ale zaawansowanych technologicznie rozwiązań. Jednak do uruchamiania systemów falownikowych potrzebna jest interdyscyplinarna wiedza techniczna, gdyż łatwo stać się ofiarą technologii w przypadku braku wiedzy dotyczącej wpływu zmian parametrów czy błędnego określenia modelu zastępczego.
- Znajomość obiektu i parametrów silnika lub umiejętność weryfikacji zidentyfikowanych parametrów zastępczych zastosowanego silnika jest elementem kluczowym dla poprawnej parametryzacji współpracy falownik – silnik.
- Wykonane badania, dotyczące zastosowania polowo-zorientowanych bezczujnikowych algorytmów przeznaczonych do sterowania silnikami indukcyjnymi o różnych mocach pozwalają zauważyć odmiennosć przebiegów i uzyskanych charakterystyk od tych, które zarejestrowano dla napędów pracujących z wektorowym algorytmem i czujnikiem prędkości. Dla algorytmów bezczujnikowych występują zauważalne dodatkowe opóźnienia zjawisk zachodzących w procesie rozruchowym: dla silnika o mocy $P_N = 1,5 \text{ kW}$ „czas wzbudzenia” wynosi $0,3 \text{ s}$, natomiast dla silnika $P_N = 110 \text{ kW}$ „czas wzbudzenia” wynosi $1,85 \text{ s}$.
- Na bazie doświadczenia stwierdzam, że współczesny zautomatyzowany cyfrowo napęd elektromechaniczny wymaga nadzoru i weryfikacji, z uwagi na wzajemne interakcje systemów. Określone



Rys. 10. Aplikacyjny przykład wykorzystania bezczujnikowego algorytmu sterowania w układzie jazdy zwalówki ZGOT w przypadku cyklu roboczego [1]

parametry sterowania w przemiennikach częstotliwości powinny być okresowo weryfikowane na obiektach, z uwagi na zużywanie się elementów mechanicznych i możliwość pojawiania się drgań powodujących zagrożenia dla obsługi, czy ograniczających zdolności ruchowe i manewrowe urządzeń.

Bibliografia

[1] Jabłoński M.: „Analiza parametrów funkcyjnych oraz modyfikacja algorytmów sterowania połowo-zorientowanego napędu falownikowego z silnikiem indukcyjnym”. 2006. Praca doktorska.

- [2] Tunia H., Kaźmierkowski M.: „Automatyka napędu przekształtnikowego”. PWN, Warszawa 1987.
- [3] Blaschke F.: „Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronenmaschine”. Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte, Vol. 1, pp. 184–193, 1972.
- [4] Vas P.: „Sensorless vector and direct torque control”. Oxford University Press 1998.
- [5] Dokumentacja SIEMENS Kompendium dla SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control v.3.2.
- [6] Dokumentacja SIEMENS Kompendium dla SINAMICS S120 / S150.

Nowa podstacja trakcyjna „Telefoniczna”

Jakub Gałęski
MPK Łódź Sp. z o.o.

W dniu 3 kwietnia 2020 r. istniejąca od 1986 roku podstacja trakcyjna „Telefoniczna”, zlokalizowana na terenie Zakładu Eksploatacji Tramwajów nr 1, po ponad 34 latach nieprzerwanej pracy została trwale wyłączona, następnie w dniu 16 kwietnia zlikwidowana. Jej miejsce zajęła całkowicie nowa, wybudowana od podstaw podstacja trakcyjna.



Nowa podstacja trakcyjna „Telefoniczna”