

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.7>

Koncepcja zastosowania oprogramowania narzędziowego przemienników częstotliwości w celu analizy i poprawy pracy zespołów napędowych maszyn górnictwa odkrywkowego

Mariusz Jabłoński - Politechnika Łódzka

Piotr Borkowski - Politechnika Łódzka

Streszczenie: Rozdział opisuje zagadnienia dotyczące możliwości wykorzystania funkcjonalności oprogramowania narzędziowego komercyjnych przemienników częstotliwości do diagnostyki i analizy pracy falownikowego zespołu napędowego składającego się z przemiennika częstotliwości, silnika indukcyjnego klatkowego, napędzającego system elektromechaniczny przeniesienia napędu oraz obciążenia. Na podstawie wykonanych rejestracji ruchowych podczas pracy zespołów napędowych oraz identyfikacji parametrów schematu zastępczego silników indukcyjnych i nastaw regulacji w strukturze algorytmu sterowania, w badanych układach napędowych, określono wpływ w/w czynników na dynamikę pracy zespołów napędowych i dokonano diagnostyki pracy napędów elektromechanicznych maszyn górnictwa odkrywkowego. Analizowane zespoły napędowe z silnikami indukcyjnymi współpracowały z napędami komercyjnymi o sterowaniu skalarnym lub wektorowym. Otrzymane wyniki poddano analizie i wykorzystano do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych. Przedstawiono możliwość wykorzystania informacji uzyskanych bezpośrednio z systemu sterowania do dokonania korekt nastaw lub zmian charakteru reakcji na wymuszenia. Zaprezentowano najciekawsze wyniki pomiarów i obliczeń.

Słowa kluczowe: diagnostyka, napęd elektromechaniczny, silnik indukcyjny, falownik, algorytm sterowania, maszyna górnictwa odkrywkowego

The concept for using frequency converters tool software to analyze and improve the operation of drive units in opencast mining machines

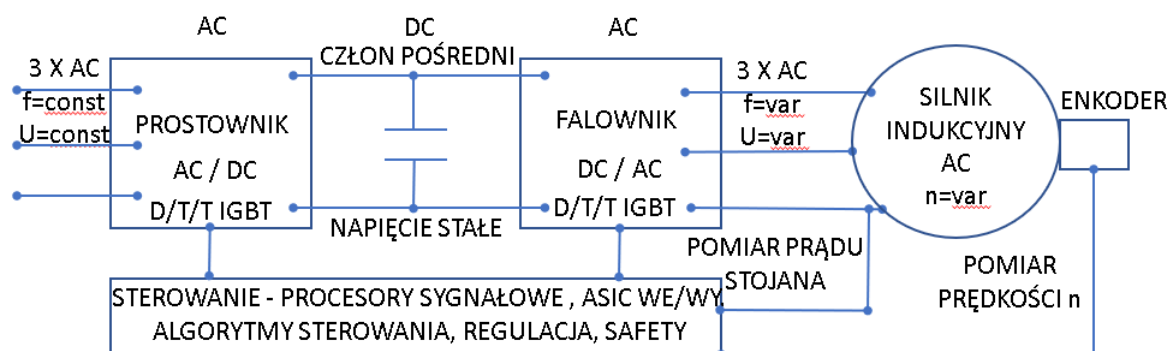
Abstract: The chapter describes the issues related to the possibility of using the functionality of commercial frequency converters and utility software for diagnostics and analysis of the operation of the inverter drive unit consisting of a frequency converter, a squirrel-cage induction motor, a driven electromechanical drive and load transmission system. On the basis of the motion registrations made during the operation of the drive units and the identification of parameters of the equivalent scheme of induction motors and control settings in the structure of the control algorithm in the tested drive systems, the impact of the above-mentioned factors on the dynamics of the drive units was determined and the work of electromechanical drives of opencast mining machines was diagnosed. The analysed drive units with induction motors cooperated with commercial drives with scalar or vector control. The obtained results were analysed and used to carry out simulation calculations. The possibility of using the information obtained directly from the control system to make corrections of settings or changes in the nature of the reaction to excitation was presented. The most interesting results of measurements and calculations were presented.

Keywords: diagnostics, electromechanical drive, induction motor, inverter, control algorithm, surface mining machine

1. Technika cyfrowego sterowania, regulacji, monitorowania i diagnostyki

Obecnie większość maszyn górnictwa odkrywkowego (MGO) wyposażona jest w układy napędowe zawierające przemienniki częstotliwości VFD (Variable-Frequency Drive) i silniki indukcyjne (IM - Induction Motors) prądu przemiennego (AC - Alternative Current). Wynika to z prostoty konstrukcji i łatwości regulacji prędkości silnika indukcyjnego oraz zastosowania do zasilania falowników napięcia (voltage inverters) z tranzystorami IGBT (ang. Insulated Gate Bipolar Transistor), wyposażonych w procesory sygnalizacyjne realizujące skalarne i wektorowe algorytmy sterowania. Pozwalają one na precyzyjną regulację prędkości obrotowej oraz momentu napędowego silnika poprzez zastosowanie metod sterowania, opartych na polowo-zorientowanym opisie parametrów silnika i parametrów

funkcyjnych falownika. Powyższe wymusza konieczność znajomości parametrów zastępczego schematu silnika indukcyjnego oraz funkcjonalności sterowania falownikiem (rys. 1). Z pomocą przychodzą wbudowane, automatycznie realizowane metody identyfikacji parametrów zastępczych silnika oraz parametrów funkcyjnych falownika. Znajomość ww. parametrów jest wymagana do konfiguracji implementowanych algorytmów sterowania. Dzięki temu mamy możliwość zdefiniowania potrzebnych parametrów zastępczych modelu silnika, wykonania strojenia nastaw regulatorów prędkości i prądów oraz diagnostyki całego układu sterowania. Do realizacji ww. zadań potrzebne jest oprogramowanie narzędziowe udostępniane przez producenta oraz wiedza z dziedziny maszyn i napędów elektrycznych oraz teorii sterowania.



Rys. 1. Schemat przemiennika częstotliwości VFD z falownikiem napięcia, członem pośrednim napięcia stałego i silnikiem indukcyjnym z pomiarem prądu i prędkości [1]

Podczas procedury uruchamiania zespołu napędowego falownik-silnik, podawane są podstawowe informacje znamionowe i konfiguracyjne. Proces regulacji i związana z nim obróbka poszczególnych sygnałów odbywa się cyfrowo za pomocą układu mikroprocesorowego DSP (Digital Signal Processor). Natomiast wszystkie pozostałe dostępne składowe toru sygnałowego dla wybranego algorytmu, według którego odbywa się sterowanie, przedstawione są w dokumentacji napędu w postaci wielu stron ilustrujących schematy blokowe poszczególnych bloków realizujących określone zadania w całym procesie układu sterowania [2].

2. Budowa i oprogramowanie napędów VFD firmy Siemens

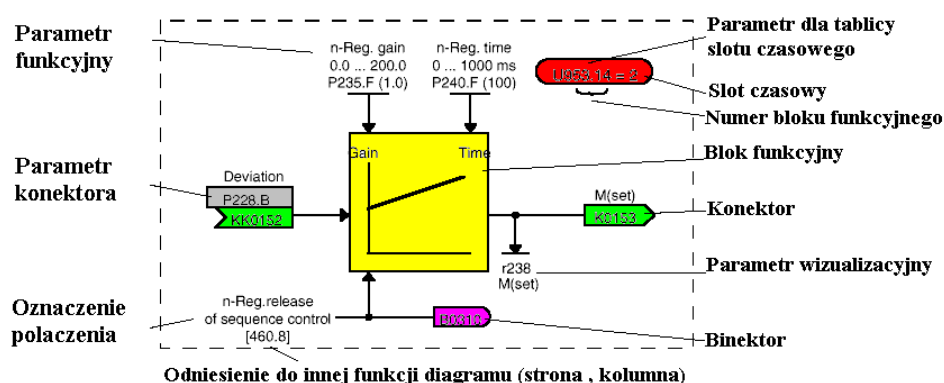
Aktualnie w napędach maszyn górnictwa odkrywkowego pracują przemienniki różnych producentów. Nasze prace koncentrowały się wokół rozwiązań firmy Siemens, która poza wieloma innymi rozwiązaniami, jest również dostawcą następujących rozwiązań serii napędów elektrycznych: SIMOVERT MASTERDRIVES, MICROMASTER oraz SINAMCS G/S (rys. 2).



Rys. 2. Przegląd napędów i oprogramowania napędów VFD stosowanych w MGO [2]

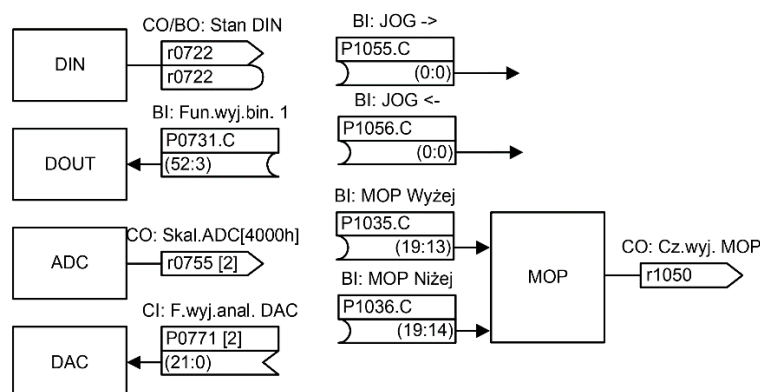
Do wymienionych przemienników, producent dostarcza do obsługi bezpłatne oprogramowanie narzędziowe: Drive Monitor dla napędów z rodziny SIMOVERT i oprogramowanie STARTER dla napędów z rodziny SINAMICS i MICROMASTER. Oprogramowania pracują na różnych platformach systemów operacyjnych. Instalowane na komputerach klasy PC, służą do konfigurowania i ustawiania parametrów napędów oraz umożliwiają parametryzację komunikacji przemysłowej i komunikację diagnostyczną z napędami za pomocą interfejsu szeregowego RS232, RS485 lub PROFIBUS DP.

W jednostkach tych zastosowano graficzny system reprezentacji algorytmów i struktur sterowania, który w uporządkowany i zrozumiały sposób przedstawia bardzo rozbudowaną strukturę działania. Zastosowano tzw. technologię BICO (BInector – COnnector), która reprezentuje logiczne połączenia sygnałów. Dostarczona dokumentacja [2, 3, 4] zawiera znormalizowaną numerację sygnałów wejściowych i wyjściowych BICO, opis algorytmów sterowania i bloków funkcyjnych – rysunek 3.



Rys. 3. Przykład opisu bloku funkcyjnego regulatora PI w technologii BICO dla SIMOVERT MASTERDRIVES [2]

Dzięki tym danym istnieje możliwość modelowania sposobu, w jaki realizowane jest sterowanie, aby spełnić wymagane warunki użytkownika. Jest to możliwe dzięki łączeniu bloków poszczególnych łączników ze sobą i ustawieniu parametrów poszczególnych bloków.



Rys. 4. Przykład opisu sygnałów w technologii BICO dla SINAMICS i MICROMASTER [2]

Z uwagi na zaimplementowaną funkcjonalność, istnieje również możliwość badania i rejestracji przebiegów lub archiwizacji charakterystyk czasowych (DriveMonitor i STARTER) oraz częstotliwościowych (STARTER), uzyskanych z konektorów cyfrowo przetworzonych danych np. prądu stojana silnika i jego składowych, prędkości obrotowej silnika, momentu obrotowego silnika czy sygnałów błędów i alarmów (rys. 4).

3. Dobór trybu pracy i algorytmu sterowania do wymagań aplikacji

Rozwój układów wielkiej skali integracji VLSI (very large scale of integration) oraz ultrawielkiej skali integracji ULSI (ultra large scale of integration) spowodował również rozwój automatyki przemysłowej i implementacji w zakresie algorytmów sterowania. Wszechobecna i szeroko rozpowszechniona technika cyfrowa obecnie oferuje znaczne ułatwienia w odniesieniu do projektów realizowanych w technice analogowej, a funkcje wykonywane cyfrowo dają dużą możliwość diagnostyki, rozbudowy i kontroli algorytmów sterowania oraz zapewniają łatwą aktualizację oprogramowania. Powyższe możliwości pozwalają zmniejszyć liczbę zastosowanych składników oraz umożliwiają zoptymalizowanie projektu układowego – rysunek 5.

P1300[3]	Tryb sterowania	Min:	Poziom
StatU:	UG	0	
GrupaP:	STEROWANIE	Fabr: 0	2
	Typ danych: U16	Max: 23	
	Aktywny: Po potw.		
	Jedn. - SU Tak		

Przy pomocy tego parametru wybierany jest tryb sterowania. Przy trybie sterowania "charakterystyka U/f" ustalany jest stosunek napięcia wyjściowego przekształtnika i częstotliwości wyjściowej przekształtnika (patrz diagram poniżej).

Możliwe ustawienia:

- 0 U/f z charakterystyką liniową
- 1 U/f z FCC
- 2 U/f z charakterystyką kwadratową
- 3 U/f z charakterystyką programowalną
- 4 Zarezerwowane
- 5 U/f dla zastosowań tekstylnych
- 6 U/f z FCC dla zastosowań tekstylnych
- 19 U/f z niezależną wartością zadaną napięcia
- 20 Sterowanie wektorowe prędkości bez enkodera (SLVC) (tzw. bezczujnikowe sterowanie wektorowe)
- 21 Sterowanie wektorowe prędkości z enkoderem (VC)
- 22 Sterowanie wektorowe momentu bez enkodera
- 23 Sterowanie wektorowe momentu z enkoderem

Indeks:

- P1300[0] : 1. Zestaw danych napędowych (ZDN)
- P1300[1] : 2. Zestaw danych napędowych (ZDN)
- P1300[2] : 3. Zestaw danych napędowych (ZDN)

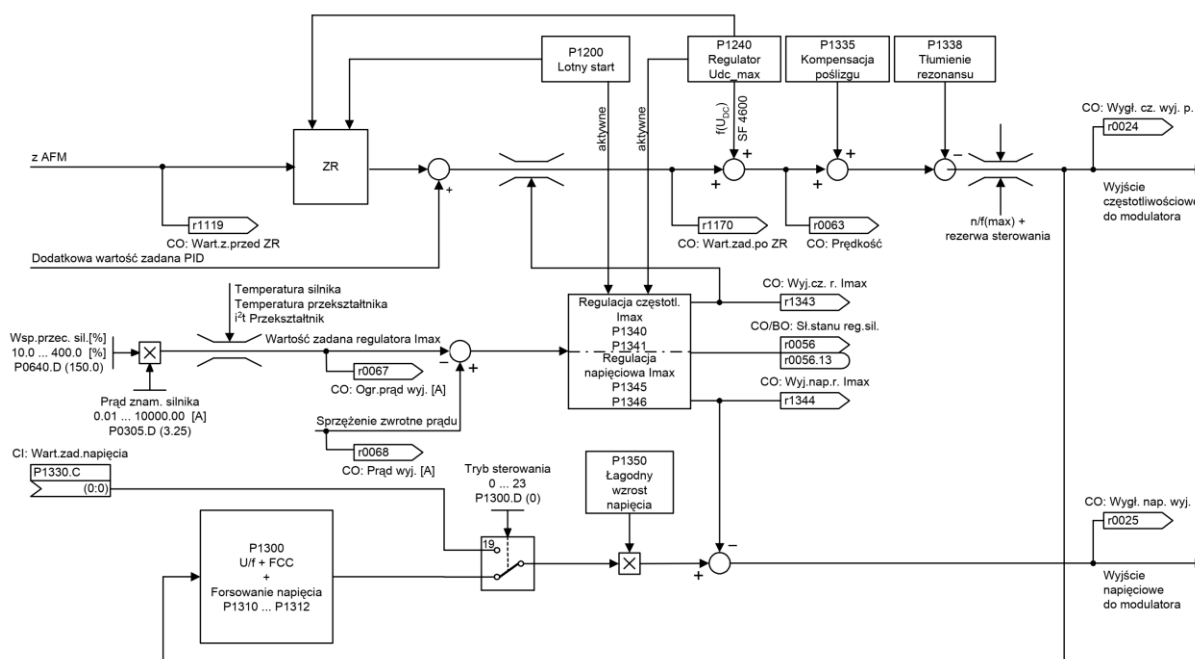
Zależność:

Ograniczone wewnętrznie do 200 Hz lub $5 \cdot$ częstotliwość znamionowa silnika (P0305), gdy P1300 $\geq$ 20 (tryb sterowania = sterowanie wektorowe). Wartość ta jest wyświetlana w r1084 (częstotliwość maksymalna).

Rys. 5. Opis parametru funkcyjnego nr p1300, odpowiedzialnego za wybór algorytmu sterowania dla przemiennika SINAMICS, 1-19 U/F, 20-23 FOC [2]

Firma Siemens już w latach 90-tych opracowała technologię BICO, co pozwoliło na opis parametrów funkcyjnych przemienników SIMOVERT, MICROMASTER i w najnowszych generacjach SINAMICS (rys. 2). O ile w klasycznym rozwiązaniu SIMOVERT do dyspozycji użytkownika pozostawały trzy algorytmy skalarne i trzy wektorowe, o tyle w napędach MICROMASTER seria 4 (MM4) i SINAMICS, do dyspozycji mamy łącznie ponad 10 różnych wariantów do wyboru. Dla VFD Micromaster seria 4 mamy do wyboru aż osiem algorytmów skalarnych i cztery algorytmy pracy wektorowej - FOC. Wybrany parametrem P1300 rodzaj sterowania ma wpływ na procesy zachodzące w całej aplikacji, gdyż często jakość sterowania ma wpływ na jakość procesu technologicznego. Natomiast, taka konstrukcja działania VFD wymaga od użytkownika bardzo dobrej znajomości technik regulacji prędkości obrotowej silników oraz interdyscyplinarnej wiedzy technicznej, gdyż nieprawidłowe nastawy mogą być niebezpieczne, zarówno dla ludzi, jak również dla maszyn i urządzeń w projektowanej czy uruchamianej aplikacji.

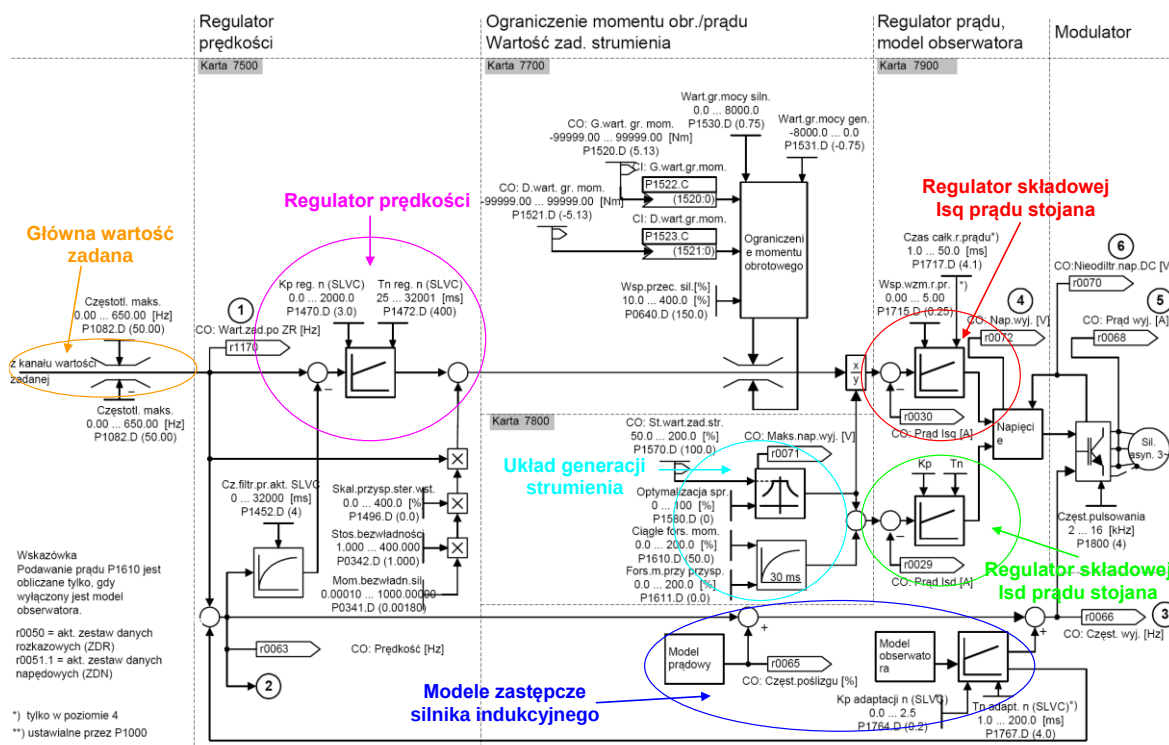
Idąc dalej śladem nastaw parametru P1300 dla MM4 należącego do tzw. napędów standardowych VFD z silnikami indukcyjnymi, dla użytkownika dostępne są algorytmy sterowania: skalarny - U/f (napięcie/częstotliwość) – rysunek 6 oraz polowo-zorientowany FOC (Field Oriented Control) – rysunek 7.



Rys. 6. Schemat algorytmu skalarnego na przykładzie przemiennika MICROMASTER SERIA 4, [1, 2, 3]

W zakresie sterowania polowo-zorientowanego mamy do wyboru SVC (Sensorless Vector Control), FOC (Field Oriented Control) i TC (Torque Control). Na rysunku 7 przedstawiono schematu algorytmu funkcjonalnego wykonanego w technologii BICO dla realizacji wybranego na etapie parametryzacji algorytmu sterowania. Należy pamiętać, że silnik indukcyjny jest obiektem nieliniowym a jego odwzorowanie w algorytmie sterowania jest realizowane za pomocą schematu zastępczego o parametrach skupionych. Warunkiem jest zbudowanie odpowiedniej bazy danych i jej aktualizacja. Na podstawie wykresu wskazowego silnika i schematu zastępczego typu T, wyodrębniono dwa główne robocze modele zastępcze silnika EMF (model siły elektromotorycznej) i CM (model prądowy). Model prądowy działa do około 10% wartości zadanej (dla SVC zdana funkcja liniowa), powyżej tej wartości przełącza się do modelu EMF. Algorytm do działania nie wymaga pomiaru prędkości obrotowej, która jest estymowana z pomiaru prądu. Koncepcja modelu EMF nie wymaga pomiaru prędkości obrotowej wału silnika. Model ten jest również mniej „wrażliwy” na zmianę temperatury, a w szczególności na

zmianę rezystancji wirnika pod wpływem zmiany temperatury silnika. Wydajność modelu EMF silnie zależy jednak od zmian rezystancji stojana silnika w zakresie niskich częstotliwości. Wykorzystanie tego modelu w przypadku układu z zamkniętą pętlą regulacji prędkości zapewnia dokładniejszą identyfikację parametrów maszyny oraz możliwość generowania maksymalnego momentu napędowego już praktycznie przy zerowej prędkości obrotowej.



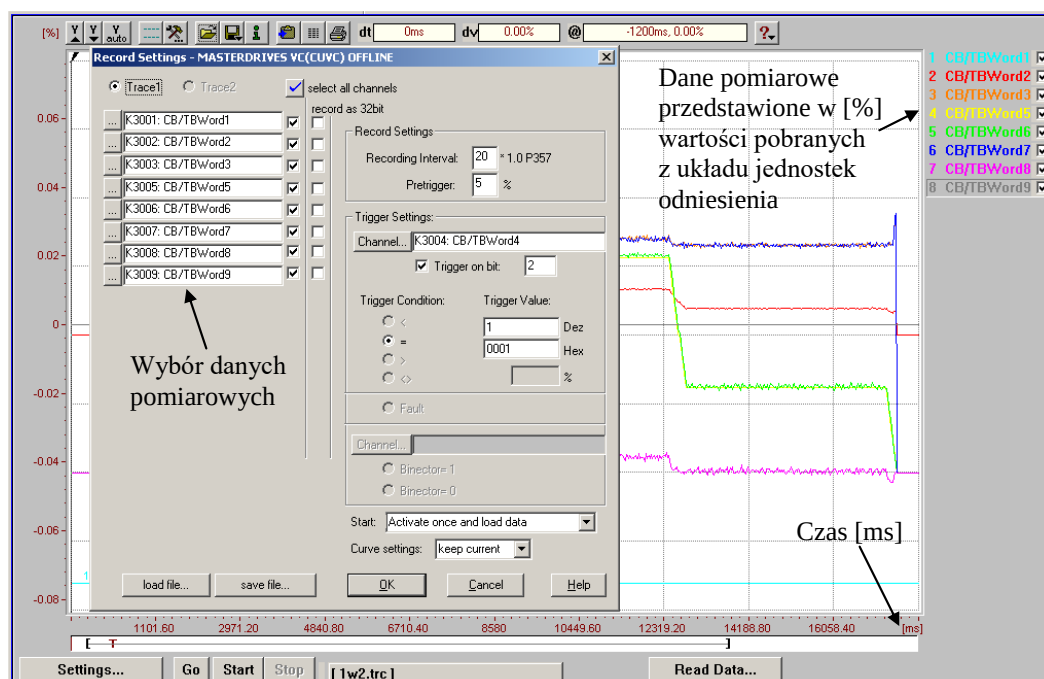
Rys. 7. Schemat blokowy algorytmu SVC dla MICROMASTER 440 z silnikiem indukcyjnym [2, 4]

W klasycznym układzie napędowym silnika zasilanego z VFD, pracującego według wybranego algorytmu sterowania, można wyróżnić następujące elementy i bloki funkcyjne (rys. 7): regulatory składowych prądu stojana, modele zastępcze podłączonego silnika, regulator EMF, układ modulacji impulsów, układy do transformacji współrzędnych dla sterowanych wielkości. Na poziomie regulacji prądów i napięć są uwzględniane przebiegi w czasie, przesunięcia fazowe i częstotliwości. Na poziomie przełączeń tranzystorów, wielkości wyjściowe z regulatorów prądu i napięcia przetworzone zostają na sygnały bezpośrednio sterujące przekształtnikiem. Układ sterowania jest układem zamkniętym, w którym są kolejno wykorzystywane sygnały uchybu regulatora prędkości i regulatorów składowych prądu stojana. Minimalizując wartość uchybu można uzyskać odtworzenie wielkości zadanej. W większości układów napędowych sterowanie sprowadza się do nastawiania i stabilizacji prędkości obrotowej. Dla tak opracowanych algorytmów w maszynach prądu przemiennego konieczna jest kontrola napięć i prądów w trzech fazach, uwzględniająca współzależności fazowe, co jest realizowane przez zastosowanie pomiaru bezpośredniego, transformacji współrzędnych i metody orientacji wektora pola regulowanych wielkości w układzie odniesionym do przestrzennego układu trójfazowego. Zmierzone wartości są następnie dostarczane do modelu silnika, gdzie odbywa się obliczenie wewnętrznych sygnałów sprzężeń zwrotnych. Przedstawiona metoda FOC polega na wyznaczeniu składowych prądu stojana silnika: składowej I_{sd} (odpowiedzialnej za generowanie strumienia) oraz składowej I_{sq} (odpowiedzialnej za generowanie momentu obrotowego). Dodatkowo konieczny jest pomiar lub ocena położenia kątownego sprzężonego wektora strumienia w maszynie, gdzie wymagana jest informacja o zmiennych stanu. Potrzebne są niedostępne pomiarowo (lub trudno dostępne) informacje takie jak np. strumień w wirniku silnika indukcyjnego. Z uwagi na powyższe opracowano metody SVC, w odniesieniu do algorytmów odtwarzających niedostępne pomiarowo zmienne stanu,

które umożliwiają zastąpienie rzeczywistego pomiaru wielkości fizycznej metodą pośrednią opartą na łatwo mierzalnych zmiennych (np. pomiar prądu stojana). Każde przełączenie sekcji mocy jest bezpośrednio zależne od stanu elektromagnetycznego silnika i jest określone na podstawie obliczeń strumienia stojana i momentu obrotowego silnika.

4. Cyfrowa rejestracja sygnałów BICO dla wybranych algorytmów sterowania

Dużą pomocą dla użytkownika, szczególnie przydatną w trakcie uruchamiania jest rejestrator przebiegów elektromechanicznych – Trace, stanowiący integralną część napędu. Jest on dostępny dla SIMOVERT i SINAMICS, gdzie przy zastosowaniu techniki BICO, Trace pozwala na rejestrację stanów dynamicznych, analizę, diagnostykę, zapis i graficzną prezentację wybranych przebiegów sygnałów (w programie DriveMonitor lub STARTER) w formie wykresu mierzonych wielkości jako np. wartości procentowe z układu odniesienia parametrów przekształtnika w funkcji czasu – rysunek 8.



Rys. 8. Wybór sygnałów i ustawienia rejestratora Trace w SIMOVERT MASTREDRIVES CUCV przy wykorzystaniu oprogramowania narzędziowego DriveMonitor [4]

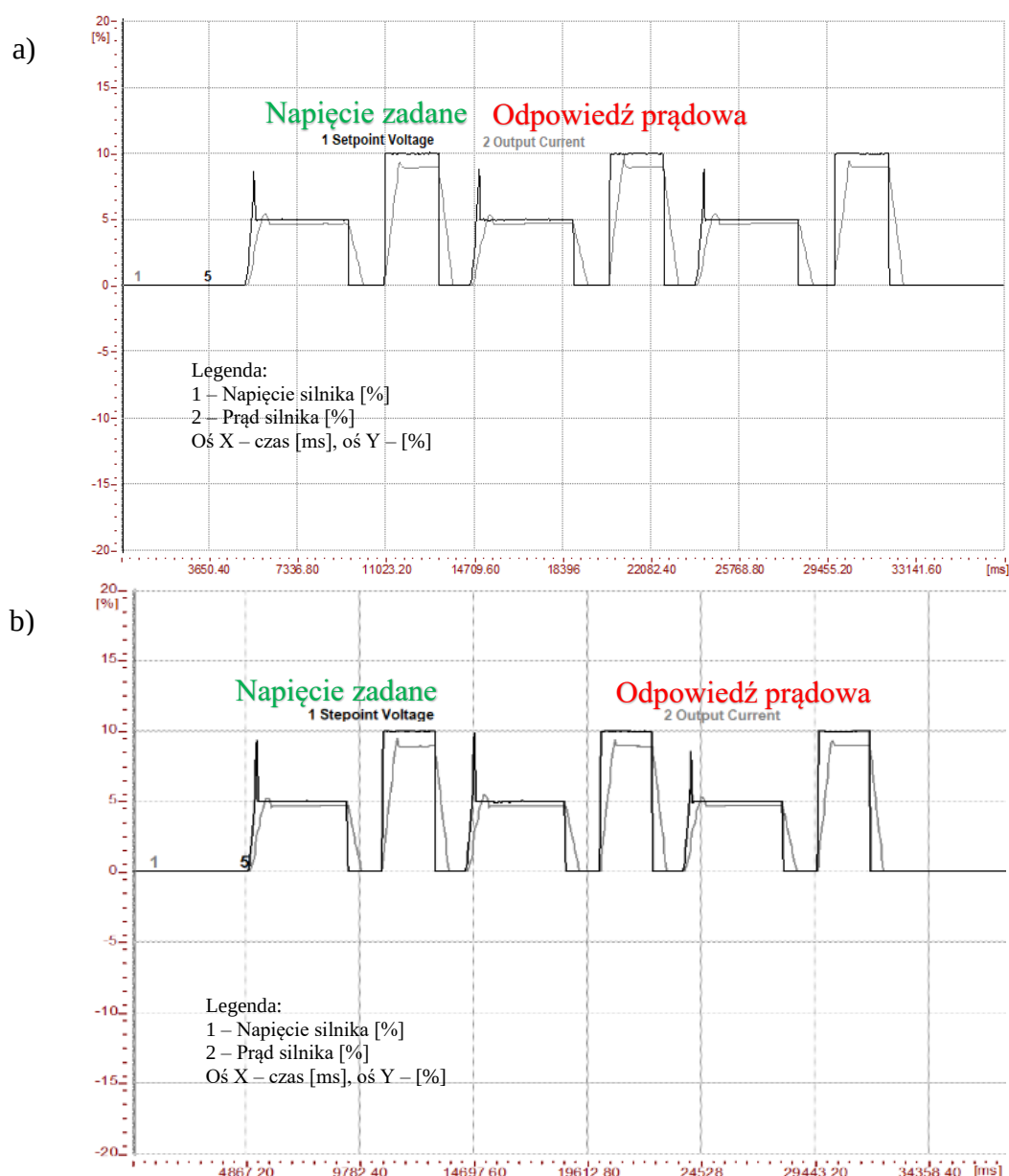
Wybrane sygnały to sygnały konektorowe (sygnały cyfrowe K16-bit lub K32-bit), które mogą pochodzić zarówno ze struktury wewnętrznej wybranego algorytmu sterowania pracą VFD lub mogą zostać wprowadzone jako dane PZD (dane procesowe), dostarczane z dowolnego węzła np. sieci komunikacyjnej PROFIBUS. Użytkownik określa czas próbkowania oraz czas wykonywania pomiarów, gdzie najkrótszy czas dyskretyzacji wynika z bazowego czasu próbkowania karty sterującej pracą przekształtnika. Domyślnie czas ten dla SIMOVERT wynosi $t_p=1.2$ ms. Komunikacja pomiędzy komputerem a przekształtnikiem jest realizowana w zależności od zastosowanego interfejsu poprzez sieć PROFIBUS lub za pomocą komunikacji szeregowej USS z łączem RS232/RS485 [4].

Oprogramowanie DriverMonitor lub STARTER pozwala nie tylko na wizualizację wyników w postaci wykresów czasowych, ale daje także możliwości ich bezpośredniej archiwizacji. Uzyskane informacje stanowią podstawowy zbiór informacji dla serwisu uruchamiającego i pozwalają zarejestrować przebiegi zarówno rozruchowe, jak również podczas pracy ciągłej silnika: prędkość, moment, prąd, zwłaszcza w stanach dynamicznych i aplikacjach specjalizowanych. Na podstawie tych danych można optymalizować nastawy i dostosowywać napęd VFD do aplikacji, np. regulator

prędkości, prądu, położenia, co pozwoli na realizację określonych zadań z możliwie najlepszym wykorzystaniem napędu i zapewni bezpieczeństwo aplikacyjne.

5. Identyfikacja nastaw parametrów podłączonych silników

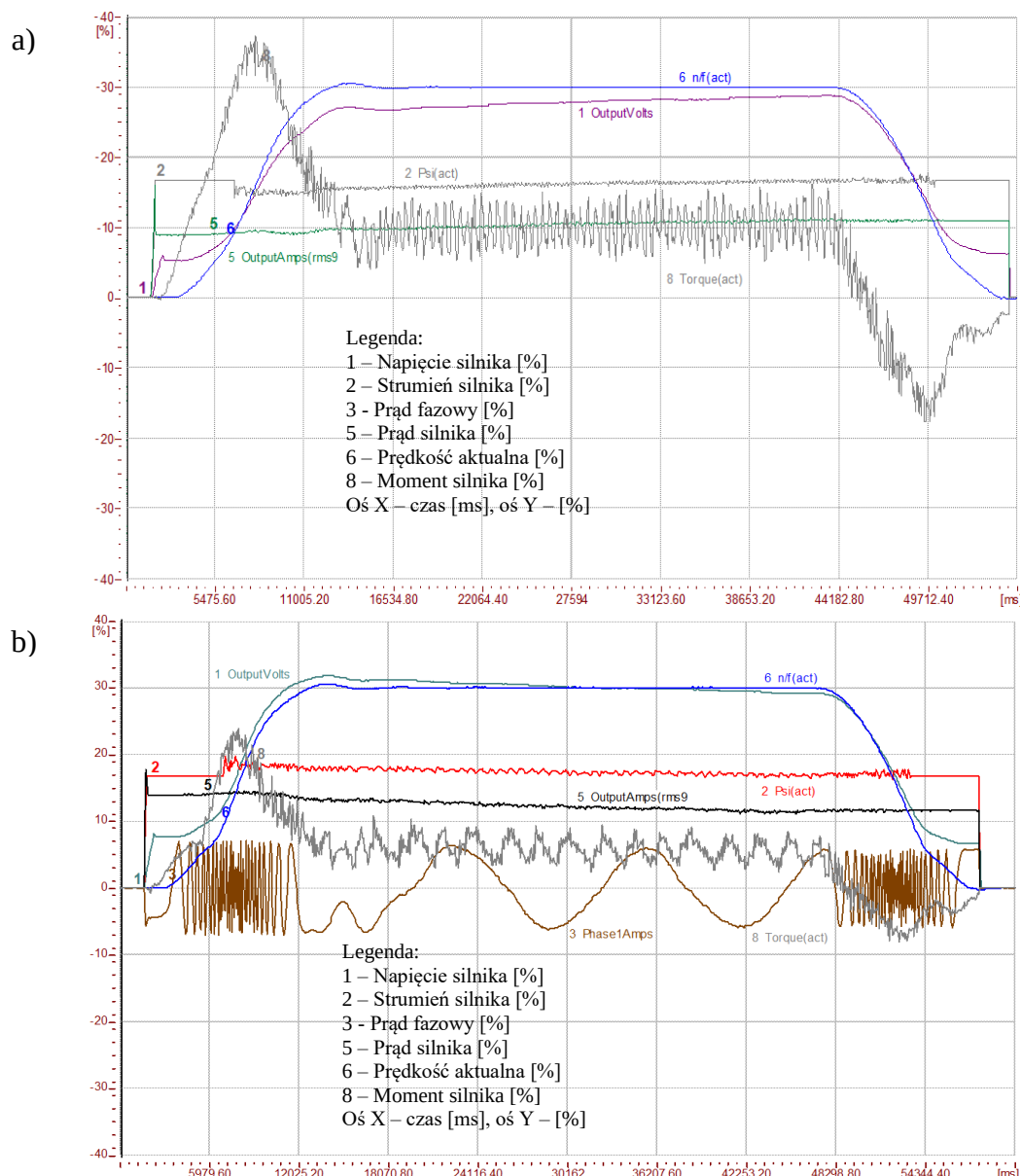
Z uwagi na stopień zaawansowania napędów VFD, producent zaimplementował procedury identyfikacji nastaw parametrów funkcyjnych i parametrów zastępczych modeli silnika. Na podstawie tzw. „biegu identyfikacyjnego” uzyskujemy potrzebne informacje opisujące napęd.



Rys. 9. Identyfikacja w stanie zatrzymanym silnika indukcyjnego: a) nastawa wstępna prądu magnesującego $I_m=0\%$, b) nastawa wstępna prądu $I_m=10\%$, $P100=3$, sterowanie SVC [5]

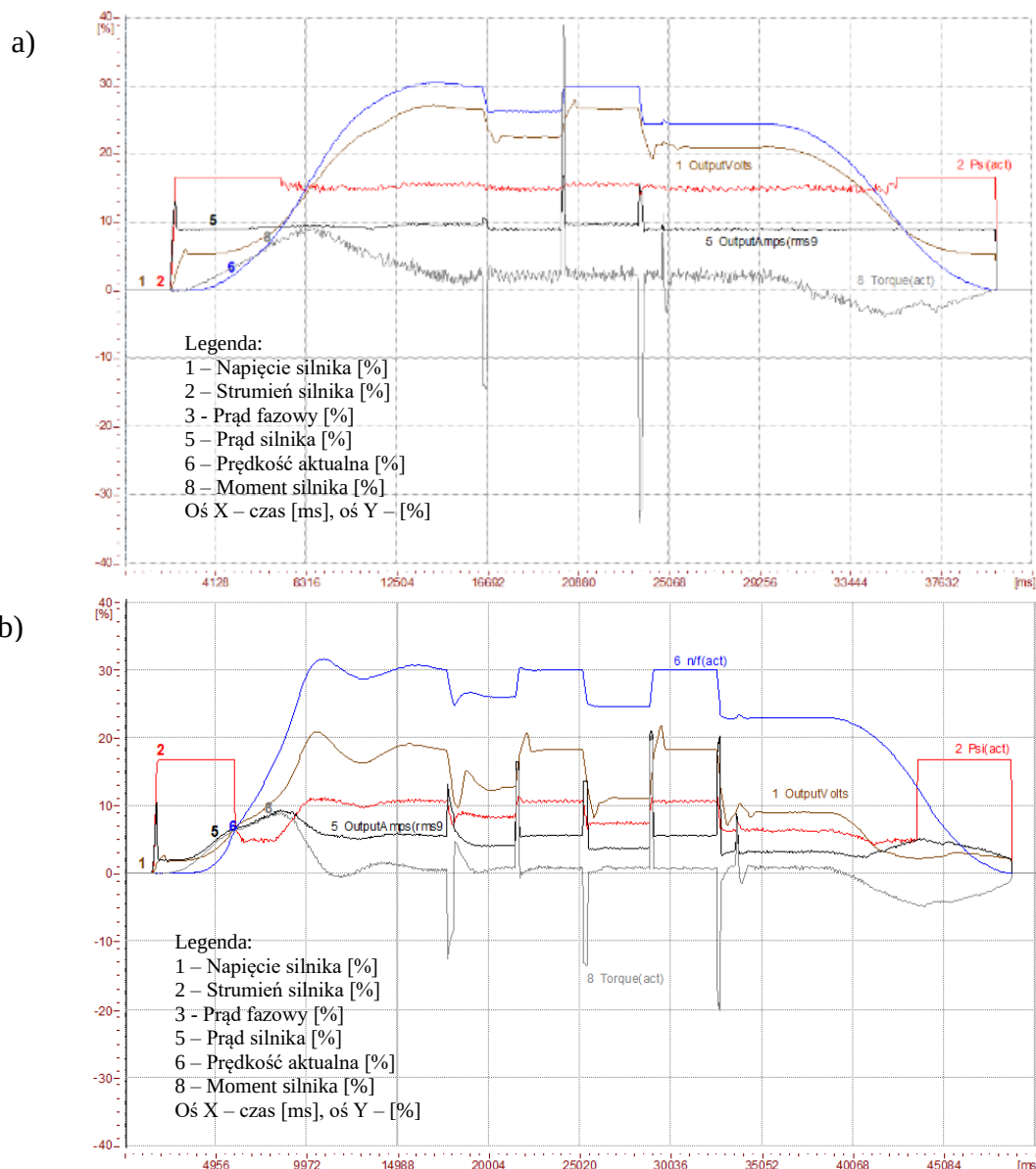
Procedura składa się najczęściej z kilku testów, w zależności od rodzaju wybranego algorytmu sterowania i zastosowanego sprzężenia zwrotnego i obejmuje: pomiar parametrów w stanie zatrzymanym, pomiar parametrów w stanie jałowym, optymalizację nastaw regulatorów i testy

półprzewodników. Wymagane parametry identyfikowane są na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych w układzie pracującym wyłącznie dla potrzeb testowych i wymagają weryfikacji. Procedura ta nie jest wymagana dla niektórych algorytmów skalarnych. Identyfikacja parametrów z rysunku 9 odbywa się według zaawansowanych metod [5] w stanie zatrzymanym wirnika (stand-still), co przypomina próbę zwarcia pomiarowego, jako odpowiedź prądowa na wymuszenie napięciowe. Aplikacja i układ napędowy muszą przed uruchomieniem zostać dokładnie rozpoznane i poddane parametryzacji w wybranym algorytmie. Do tego celu służy odpowiednio dobrana przez producenta procedura parametryzacji. Wymagane są dane z tabliczki znamionowej silnika, parametry zastępcze modeli i nastawy regulatorów. Identyfikacja ma kilka etapów i wylicza podstawowe parametry np. modelu silnika dla polowo-zorientowanych algorytmów sterowania: rysunki 9, 10, 11.



Rys. 10. Bieg identyfikacyjny silnika indukcyjnego dla próby biegu jałowego: a) nastawa wstępna prądu magnesującego $I_m=0\%$, b) nastawa wstępna prądu magnesującego $I_m=10\%$, $P100=4$, sterowanie FOC [5]

W sytuacji, kiedy próbę można wykonać na ruchu silnika, jego parametry schematu zastępczego znajdujące się w gałęzi poprzecznej, zostaną zidentyfikowane dokładniej podczas biegu bez obciążenia – „no load” (rys. 10). Na rysunku 10 można zauważyć, jaki wpływ na przebieg identyfikacji oraz finalne nastawy mają błędnie wprowadzone skrajne warunki początkowe – rys. 10b). Przebieg próby jest odmienny, widoczne są oscylacje w przebiegach, wydłuża się czas próby, a skrajnie może dojść do sytuacji, w której próbę będzie trzeba powtórzyć. Generalnie, bieg identyfikacyjny z rysunków 10 i 11 pozwala na określenie rezystancji uzwojeń, indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń, stanu nasycenia rdzenia oraz inercji układu.



Rys. 11. Bieg identyfikacyjny silnika indukcyjnego dla próby optymalizacji nastaw regulatorów:
a) nastawa wstępna prądu magnesującego $I_m=0\%$, b) nastawa wstępna prądu magnesującego $I_m=10\%$,
 $P100=4$, sterowanie FOC [5]

Dodatkowo na rysunku 11 przedstawiono dostępny test optymalizacji nastaw regulatora prędkości i przyspieszeń, mający zastosowanie tylko w trybie sterowania wektorowego FOC. Parametryzowany VFD może również wykonać autotest i test czujnika prędkości oraz test półprzewodników. Na rysunku 11 daje się zauważyć negatywny wpływ na przebieg identyfikacji oraz finalne nastawy, błędnie

wprowadzone warunki początkowe z celowo zaniżonym prądem magnesującym (rys. 11 b). Widoczne są oscylacje w przebiegach dla wartości $I_m=10\%$, układ zupełnie inaczej buduje bazę informacji, czas próby się wydłuża, a skrajnie może dojść do błędu i próba zostanie zatrzymana (rys. 11a).

6. Nastawy parametrów funkcyjnych i uruchomienie zespołu napędowego

Podczas badań diagnostycznych wykonano szereg pomiarów dotyczących stanów rozruchu i hamowania silnika dla różnych algorytmów sterowania. Poniżej zestawiono najciekawsze wyniki pomiarów zarejestrowanych podczas rozruchu układów VFD w module Trace.

6.1. Algorytmy sterowania skalarnego dla SIMOVERT VC

Dla sterowania skalarnego regulacja prądu stojana jest realizowana za pomocą zmian składowej I_{sq} (podobnie jak w sterowaniu wektorowym). Odbywa się to przy takim wyborze wartości prądu stojana I_{sd} , jaka wynika z aktualnej wartości strumienia zależnej od zadanych zmian stosunku U/f , a finalnie składowa I_{sq} reprezentuje prąd stojana pomniejszony o składową I_{sd} odpowiedzialną za strumień silnika.

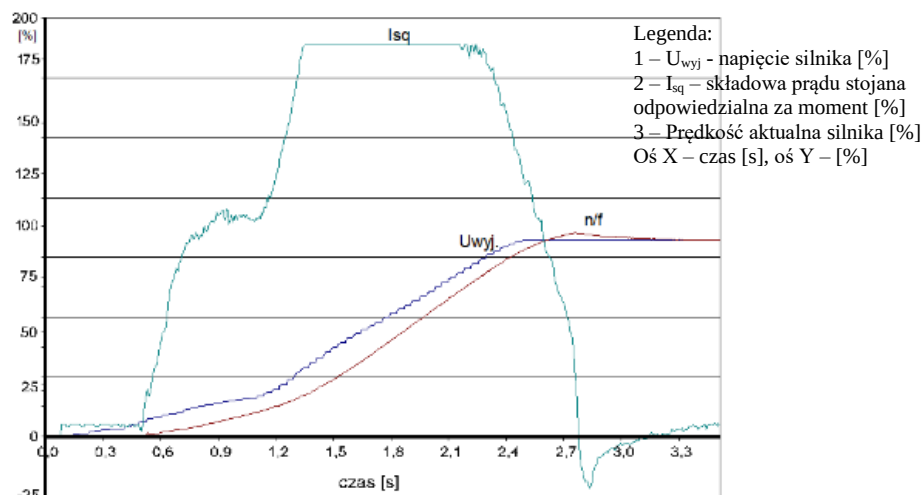
Rysunek 12a) prezentuje sterowanie z pomiarem wartości chwilowej – UFC. Sterowanie to jest realizowane jako sterowanie częstotliwości z podporządkowanym obwodem regulacji prędkości z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego. Metoda ta umożliwia regulację momentu zadaną dokładnością. Sterowanie tego typu stosuje się dla napędów indywidualnych z silnikami indukcyjnymi, które przy kompensacji poślizgu nie osiągają dostatecznej dokładności regulacji prędkości. Wartość chwilowa prędkości jest mierzona poprzez przetworniki analogowe lub cyfrowe.

Z kolei rysunek 12b) przedstawia sterowanie bez pomiaru prędkości obrotowej – UFO. Zmiennymi sterującymi są wielkości powstające poza silnikiem, takie jak napięcie i częstotliwość. Wartość zadana obu sygnałów podawana jest do układu falownika wytwarzającego przebieg PWM (Pulse With Modulation), którego podstawowa harmoniczna jest sinusoidą, przekazywaną dalej do obwodu stojana. Istotnym elementem tego algorytmu sterowania jest brak konieczności stosowania pętli sprzężenia zwrotnego od prędkości wału. Sterowanie to jest wykorzystywane w napędach indywidualnych i grupowych przy małej i średniej dokładności stabilizacji prędkości.

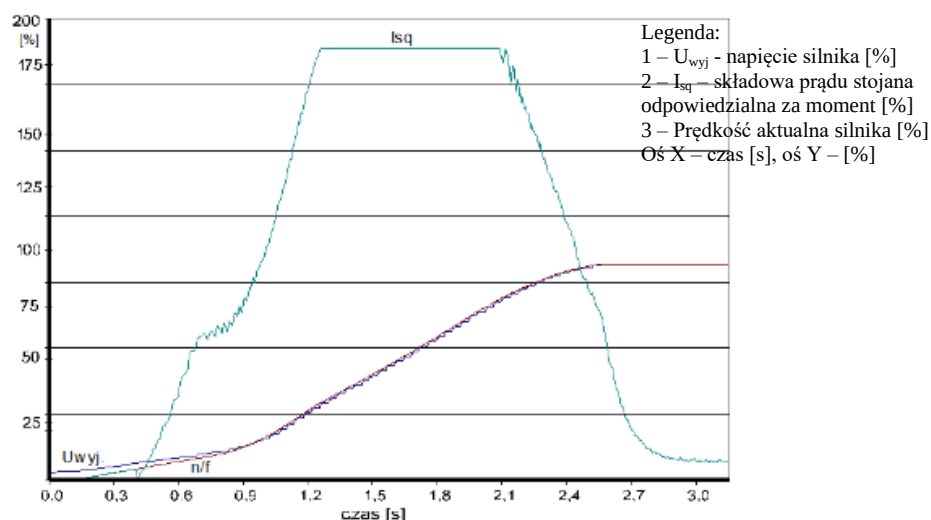
Żaś na rysunku 12c) zaprezentowano sterowanie w napędach maszyn włókienniczych – UF2. Algorytm jest podobny do układu sterowania częstotliwości UFO, ale bez pętli regulacji częstotliwości i kompensacji poślizgu. Sterowanie jest wykorzystywane w napędach indywidualnych i grupowych przy wymaganej dużej dokładności stabilizacji prędkości.

Porównując przebiegi charakterystyk sterowania skalarnego uzyskane na podstawie dostępnych w programie karty CUVK sterującej pracą przekształtnika SIMOVERT metod sterowania częstotliwościowego $U/f=\text{const}$ (algorytmy sterowania z rys. 12), najlepsze rezultaty pozwala uzyskać sterowanie procesu rozruchu przy zastosowaniu obwodu sprzężenia prędkości UFC. Układ tak skonfigurowany pozwala na szybkie rozpędzenie silnika przy zachowaniu zadanej maksymalnej wartości prądu stojana określonej parametrem funkcyjnym.

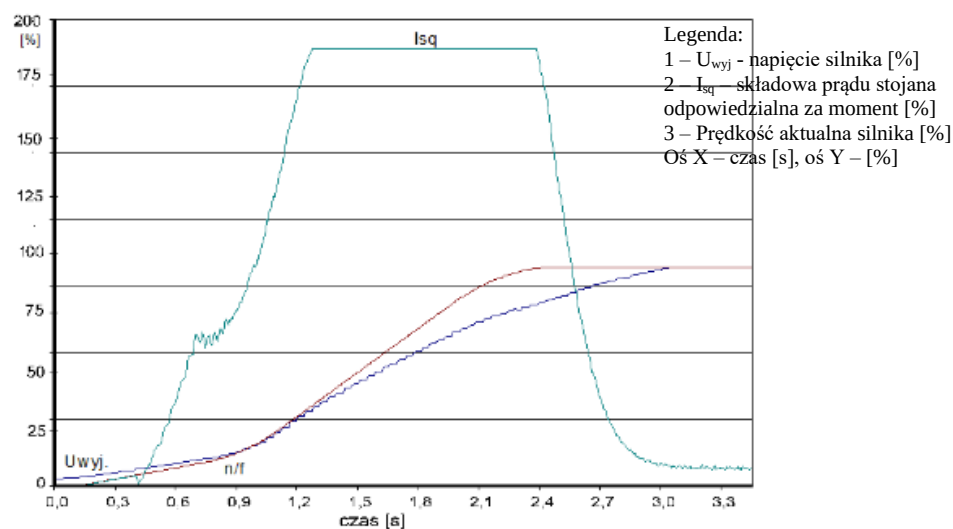
a) Algorytm U/f
– układ
sprzężenia
zamknięty



b) Algorytm U/f
– układ
sprzężenia
otwarty



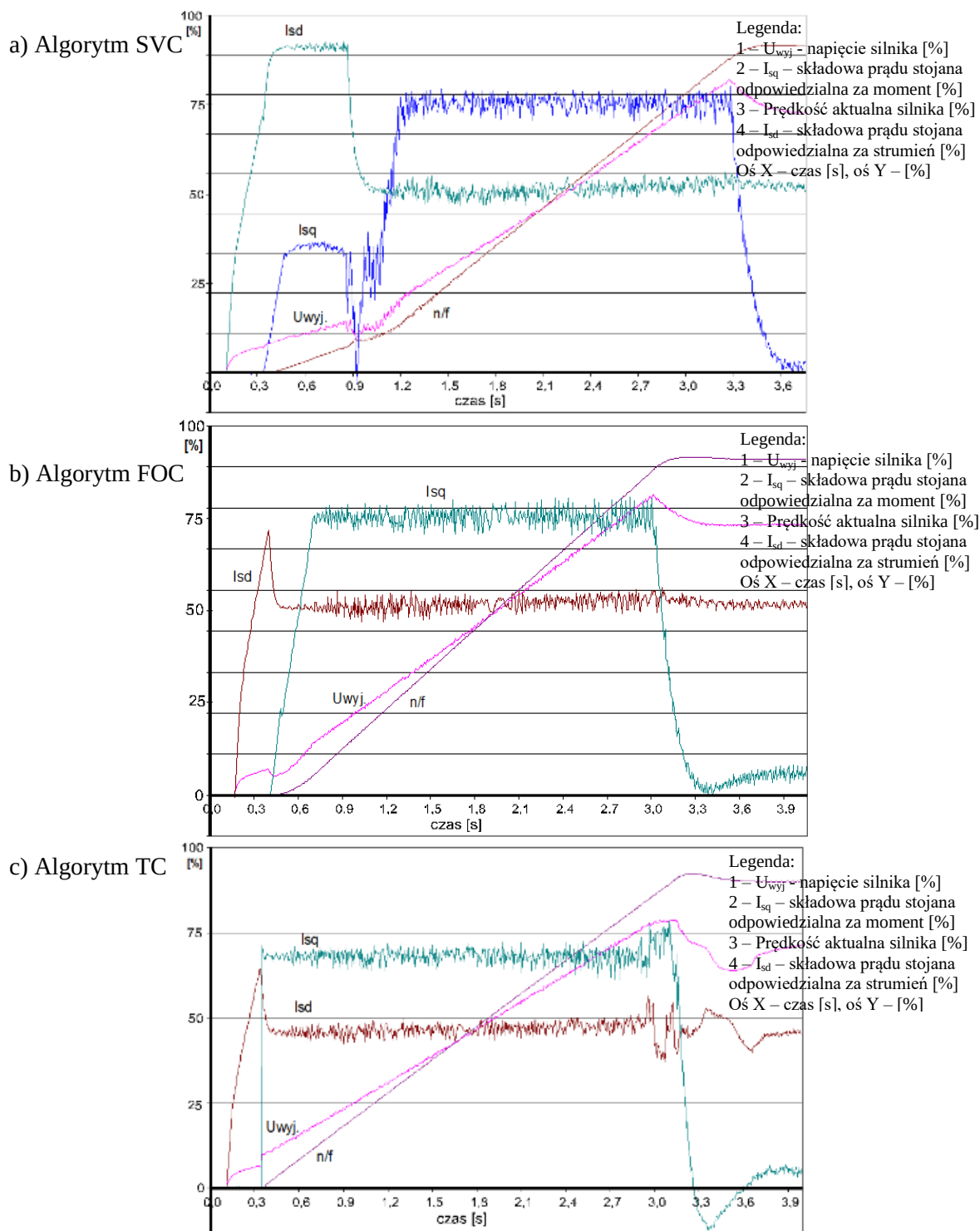
c) Algorytm U/f
– charakteryst.
paraboliczna



Rys. 12. Przebiegi dynamiczne prądu, prędkości i napięcia z rozruchu silnika Sg90L4 sterowanego z falownika w układzie skalarnym: a) UFC, b) UFO, c) UF2 [5]

6.2. Algorytmy regulacji polowo-zorientowanej dla SIMOVERT VC

Odmiany tego rodzaju regulacji stosuje się do silników indukcyjnych w napędach indywidualnych i grupowych z obciążeniem sprzężonym mechanicznie. Przy takiej regulacji dynamika napędu z silnikiem indukcyjnym staje się porównywalna z napędem prądu stałego.



Rys. 13. Przebiegi dynamiczne prądu, prędkości i napięcia z rozruchu silnika Sg90L4 sterowanego z falownika w układzie: a) SVC, b) FOC, c) TC [5]

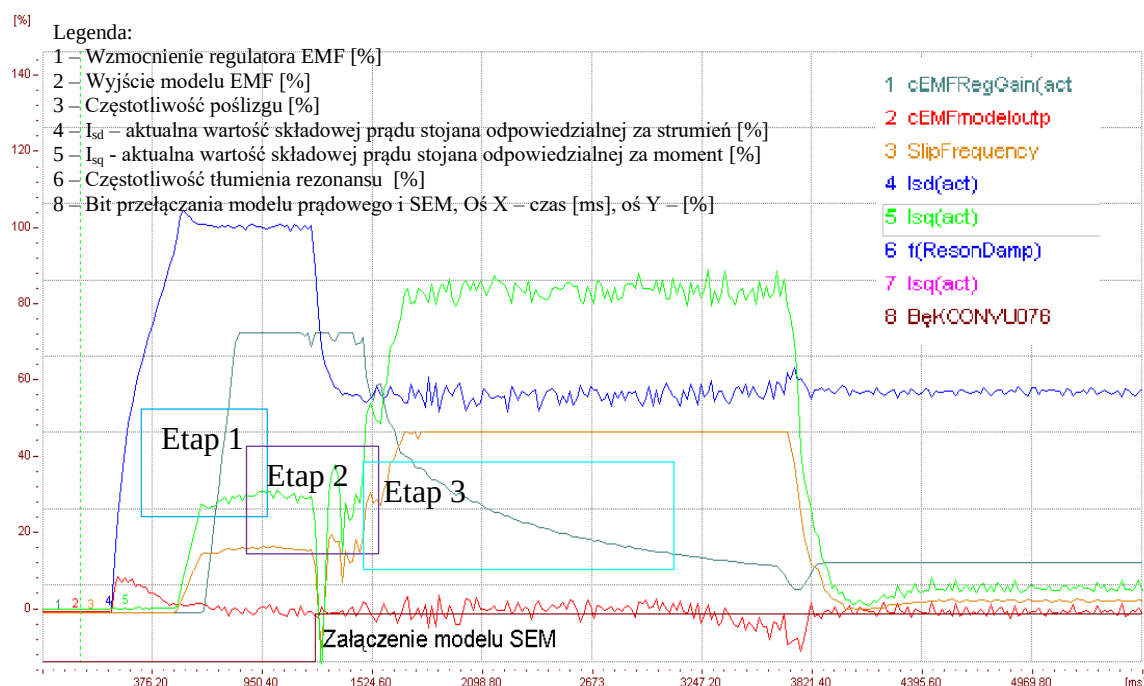
Na rysunku 13a) zaprezentowano regulację częstotliwości (bez czujnika prędkości) - SVC. Jest to najbardziej uniwersalny sposób regulacji połowo-zorientowanej, odpowiedni dla układów napędowych z silnikami indukcyjnymi, przy szerokim zakresie wymagań aplikacyjnych oraz wymagań, co do dynamiki układu.

Z kolei na rysunku 13b) przedstawiono regulację prędkości z czujnikiem prędkości - FOC. W tym przypadku dynamika napędu z silnikiem indukcyjnym staje się porównywalna z dynamiką napędu prądu stałego, co jest możliwe dzięki ciągłemu pomiarowi sygnału prędkości, estymacji momentu oraz regulacji prędkości, momentu i składowych prądu stojana. Dokładność regulacji FOC zależy od stopnia zaawansowania opisu modelu silnika oraz wyznaczenia aktualnej wartości momentu.

Zaś na rysunku 13c) pokazano regulację momentu z czujnikiem prędkości - TC (odmiana DTC). Układ stosuje się przy wysokich wymaganiach odnośnie dynamiki napędu, a szczególnie w sytuacji, kiedy wymagana jest realizacja zadanego przebiegu momentu napędowego. Podczas wykonywania diagnostyki pracy napędów VFD stwierdzono, że ważną rolę odgrywają ustawione parametrycznie wartości ograniczeń. Poprawny i uzasadniony technicznie wybór nastaw parametrów do ograniczeń wartości maksymalnych prądu i momentu (w granicach bezpieczeństwa, wynikających z nastaw oraz danych znamionowych silnika i przekształtnika).

6.3. Diagnostyka proces rozruchu na przykładzie sterowania wektorowego

Przebieg procesu rozruchu silnika przy sterowaniu połowo-zorientowanym realizowany przez SIMOVERT MD VC możemy podzielić na dwa etapy. Pierwszy z nich to wzbudzenie maszyny, etap związany z koniecznością wytworzenia odpowiedniego strumienia w silniku.



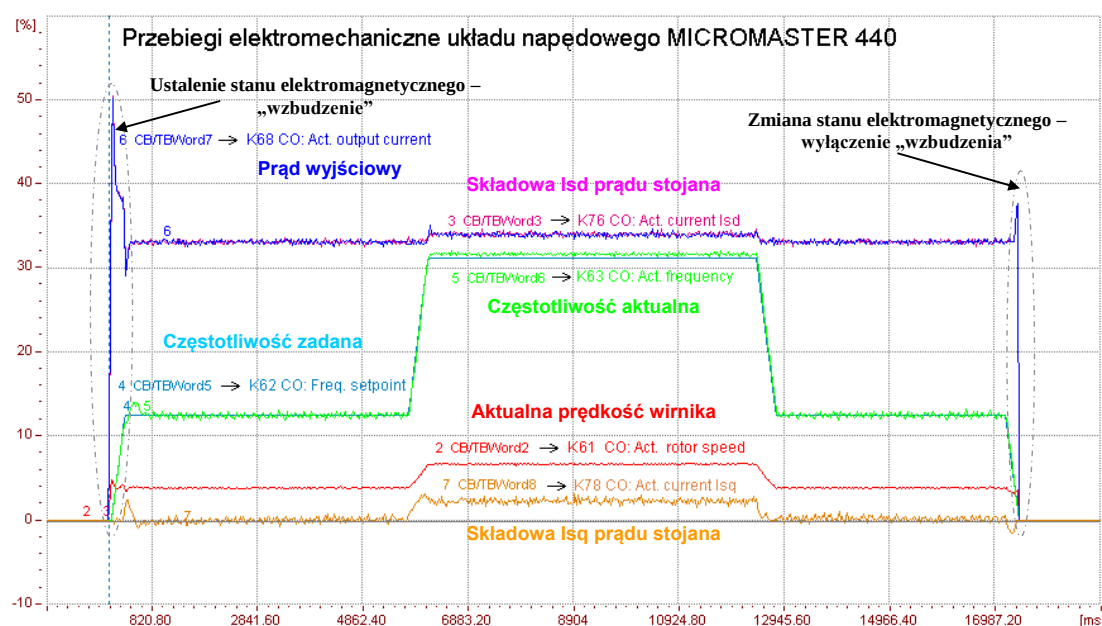
Rys. 14. Rozruch silnika Sg90L4 w układzie algorytmu SVC i czasie rozruchu $t_r=2s$, [5, 6, 7]

Układ dokonuje tego podając na uzwojenia prąd stały, reprezentowany przebiegiem składowej I_{sd} , gdzie wartość wstępna uzyskiwana jest z identyfikacji, a po czasie, zatwierdzonym parametrem, pojawia się składowa I_{sq} i narasta wartość zadana częstotliwości. W celu diagnostyki pracy napędu, dokonano rejestracji przebiegów rozruchowych (rys. 14). Na powyższym rysunku dokładnie widać podstawowe ograniczenia sterowania SVC, które dotyczą precyzyjnego obliczenia aktualnego położenia wektora strumienia wirnika dla małych częstotliwości (Etap 1). Do chwili, gdy operacja ta stanie się możliwa, układ przeprowadza proces rozpędzania wstępnego (Etap 2). Brak kontroli pola na tym etapie jest

wyraźny. Można zaobserwować, iż w przedziale czasowym od chwili startu do osiągnięcia Etap 3 i przełączenia na model SEM, przebieg jest modelowy i wyidealizowany oraz wyraźnie odbiega kształtem i wartością od przebiegu rzeczywistego. Przekroczenie zakresu zmiany modelu (model SEM) zapewnia skuteczną realizację obliczeń na podstawie pomiaru prądów fazowych. Konsekwencją tego są powstające na początku rozruchu wahania i oscylacje. Z tego względu diagnostyka pracy i poprawne przeprowadzanie procesu identyfikacji parametrów schematu zastępczego silnika oraz dokonanie optymalizacji nastaw regulatorów jest kwestią zasadniczą. Pomiar w układach ze sprzężeniem prędkości (rys. 13b) wyraźnie wskazują, że stosując sprzężenie zwrotne, tego ograniczenia możemy uniknąć. Sterowanie połowo-zorientowane zapewnia realizację narzuconych ograniczeń z dokładnością parametrów wyznaczonych przez zastępczy model silnika i to bez konieczności wprowadzania dodatkowych korekt. Procesy rozruchowe silników pracujących w algorytmie ze sprzężeniem zwrotnym prędkościowym pozwalają określić aktualny strumień oraz stan elektromagnetyczny silnika w każdej chwili czasowej.

6.4. Diagnostyka pracy algorytmu sterowania

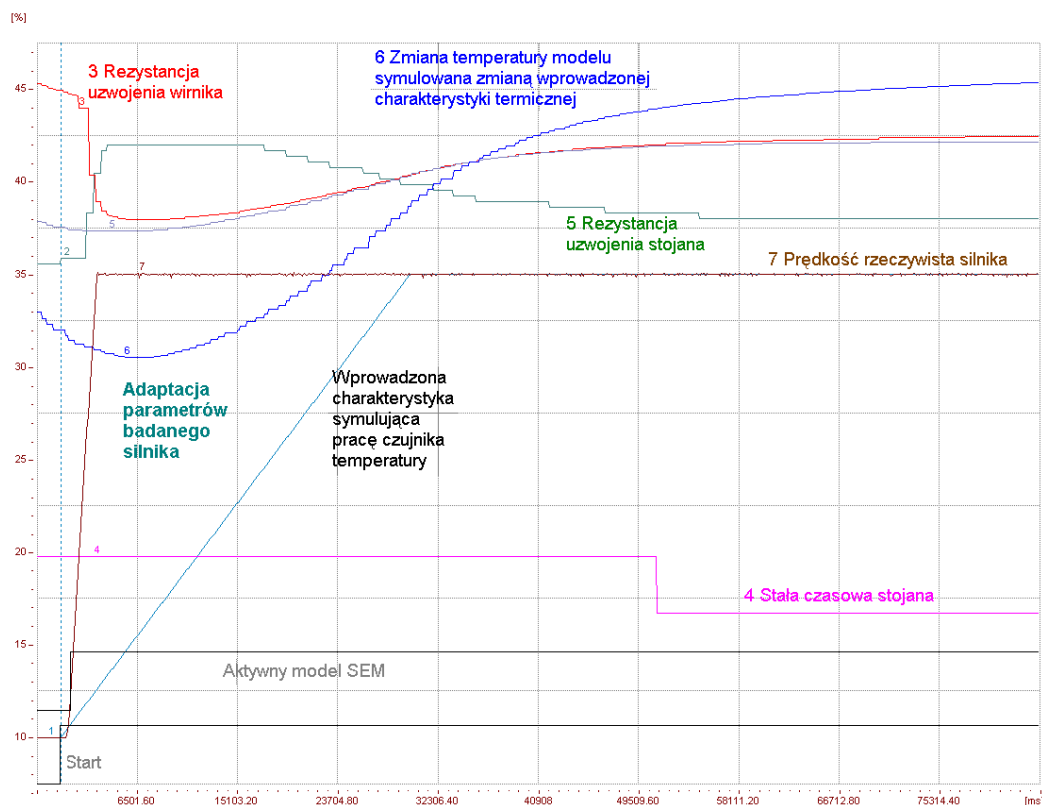
Na rysunku 15 mamy przebieg rozruchowy silnika, który po wstępnej analizie przebiegów, pozwala na stwierdzenie, że składowa I_{sd} prądu stojana (strumień), nie została określona poprawnie w wybranym algorytmie sterowania. Przemiennek poddano przed rejestracją procedurze automatycznej identyfikacji, ale VDF Micromaster nie posiadają możliwości rejestracji Trace. Pomiary wykonano jednak za pomocą przemiennek SIMOVERT MD VC, który rejestrował dane z Micromaster 440 po sieci PROFIBUS [4].



Rys. 15. Rejestracja sieciowa przebiegów rozruchowych silnika indukcyjnego zasilanego z przetwornika MICROMASTER 440 [4, 8]

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów, zauważamy, że niewłaściwy dobór nastawy prądu magnesującego I_m (składowa I_{sd} prądu stojana), ma zasadniczy wpływ na przebieg procesów rozruchowych a jego poprawne określenie stanowi istotny problem. Zjawisko to objawia się zmianą charakteru i wydłużeniem elektromagnetycznych procesów przejściowych. Generowane są również opóźnienia w procesie rozruchu. Na rysunku 15 zauważamy, że od chwili podania sygnału START, opóźnienie trwa około 0,5 s. Dla napędów dużej mocy, takie opóźnienia będą sięgały nawet kilku sekund. W przypadku sterowania FOC elementem, który ma zasadnicze znaczenie będzie dokładność wyznaczenia wartości rezystancji stojana uzwojenia. Jeśli rzeczywista wartość rezystancji będzie mniejsza od wartości wprowadzonej do modelu, układ sterowania dopasowuje parametry początkowej fazy rozruchu do zadanych warunków, odpowiednio zwiększa napięcie w celu skompensowania spadku

napięcia na rezystancji uzwojeń. W konsekwencji prędkość wirnika w czasie, w którym rozpoczyna się jego obliczenie na podstawie prądów fazowych, jest większa niż potrzeba procesu sterowania w tym punkcie. Na podstawie badań modelu zastępczego ze stałymi parametrami silnika indukcyjnego w stanach dynamicznych widać, że jego zachowanie jest zbliżone do odpowiedzi silnika rzeczywistego pomimo przyjęcia w modelowaniu takich uproszczeń jak pominięcie wpływu histerezy, przyjęcie stałego nasycenia obwodu magnetycznego oraz pominięcie zmian przesunięcia prądu w uzwojeniach wirnika – rysunek 16.



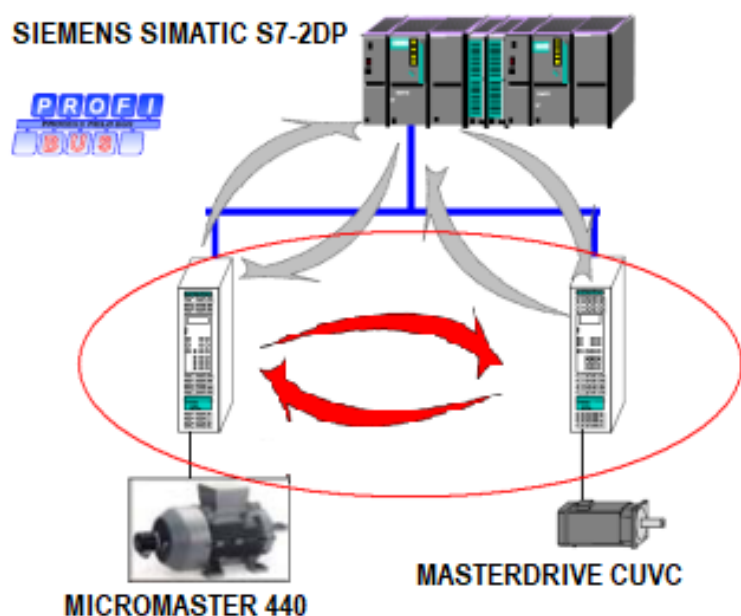
Rys. 16. Zmiana parametrów schematu zastępczego badanego silnika Sg90-L4, po wprowadzeniu wybranej charakterystyki termicznej [9]

Na rysunku 16 przedstawiono graficznie zmiany zarejestrowanych parametrów schematu zastępczego silnika, wybranych z modelu temperaturowego z załączoną funkcją adaptacji temperatury silnika. W opisanym przypadku silnik nie posiada czujnika temperatury, a jej zmiany są symulowane funkcją zaprogramowaną charakterystyką klasycznego czujnika PT100, tak aby można tworzyć dowolną termiczną charakterystykę pracy, a następnie wprowadzać ją do modelu temperaturowego, realizując w ten sposób funkcję adaptacji zmian parametrów ze względu na symulowane zmiany temperatury. Dzięki temu możemy diagnozować zachowanie napędu MGO pracującego w różnych warunkach pogodowych.

7. Zastosowanie sieci PROFIBUS do badań i diagnostyki układów napędowych

Przemienniki SIMOVERT MD VC mają mocno rozbudowane funkcje diagnostyczne, dzięki którym są niezastąpione w rozwiązaniach specjalizowanych czy nietypowych, gdzie konieczny jest wkład własny w postaci twórczej pracy intelektualnej. Dodatkowo, zastosowanie sieci PROFIBUS oraz szybkiej komunikacji cyklicznej w układach sterowania z prędkością transmisji rzędu 12 Mb/s, pozwalają sterować napędami VFD w czasie rzeczywistym. Urządzenia stosowane w przemyśle posiadają interfejs PROFIBUS lub aktualnie PROFINET, co daje możliwość pracy peryferyjnej

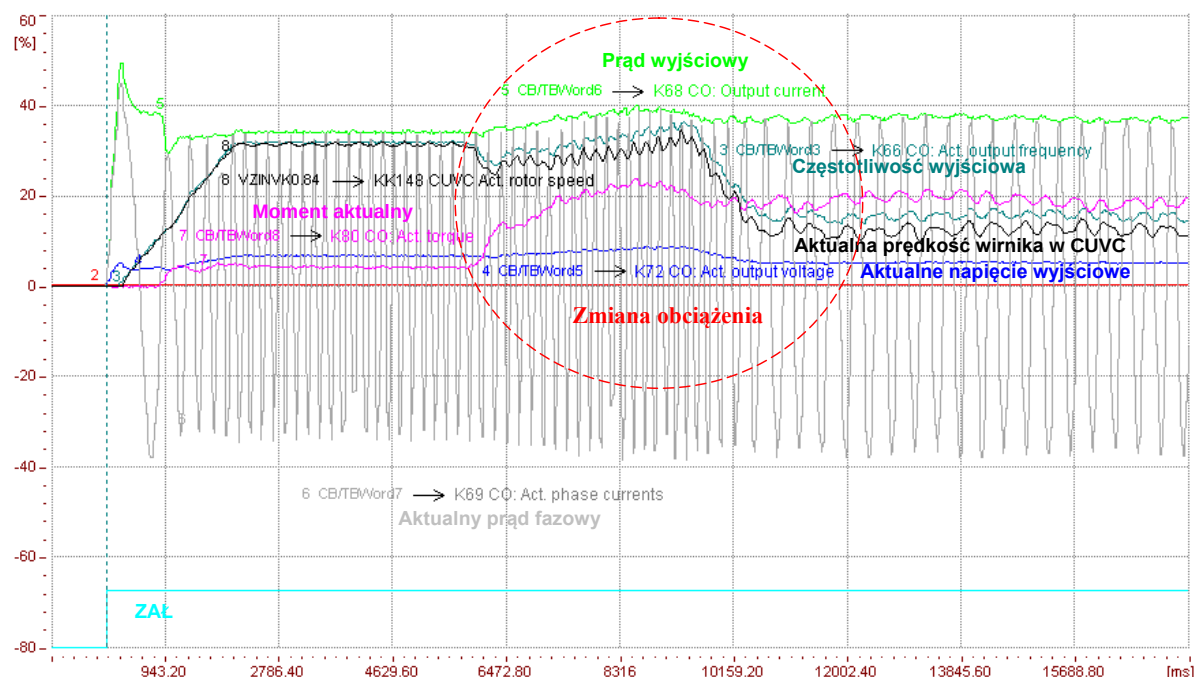
i pozwala na rejestrację oraz analizę stanów dynamicznych w tych węzłach sieci, które były dotychczas niedostępne. Jako przykład diagnostyki napędów wybrano serię MICROMASTER, która również jest produkcji firmy SIEMENS, ale należy do tzw. napędów standardowych. Napędy te posiadają technikę BICO (binektor-konektor), szereg rozbudowanych algorytmów sterowania, zaawansowane metody identyfikacji obiektowej, ale nie posiadają modułu kontrolnego Trace. W ten sposób komfort pracy i możliwość diagnostyki dla użytkownika uruchamiającego napęd MICROMASTER jest mocno zaniżony. Natomiast w przypadku trudności ruchowych nie ma możliwości oceny i dokonania badań stanów dynamicznych. Autorzy postanowili zaprezentować cyfrową funkcjonalność diagnostyki z wykorzystaniem sieci komunikacyjnych, aby wykonać badania i analizę przebiegów sygnałów pochodzących zarówno z wewnętrznej struktury sterowania badanego napędu MICROMASTER 440 jak i z dowolnego węzła sieci PROFIBUS. Rejestrowane sygnały są przebiegami w funkcji czasu, a do pomiarów wykorzystano moduł Trace w napędzie SIMOVERT MASTERDRIVES CUV C oraz szybką transmisję danych poprzez sieć PROFIBUS. Należy zaznaczyć, że ze względu na krótkie czasy próbkowania i wymiany danych, uzyskane przebiegi z badań stanów dynamicznych pozwalają na poprawną interpretację zachodzących zjawisk [5, 6].



Rys. 17. Konfiguracja sieci PROFIBUS DP do wymiany danych komunikacyjnych z MICROMASTER440 poprzez SIMATIC S7 do SIMOVERT CUV C - sieciowa diagnostyką pracy napędu Micromaster 440 [2, 10]

Na rysunku 17 przedstawiono konfigurację sieci PROFIBUS wspartej o elementy projektu hardware stworzonego w programie SIMATIC STEP 7. W tej konfiguracji jeden z przekształtników SIMOVERT MD VC, z uwagi na wbudowaną możliwość rejestracji przebiegów, jest wykorzystywany jako element rejestratora danych PZD pochodzących z sieci PROFIBUS. Pełni on tylko funkcję rejestratora z łącznym czasem próbkowania rzędu pojedynczych milisekund (czas próbkowania napędu i wymiany danych poprzez sieć ok. 0,8 ms). Sterownik PLC wysyła do napędów SIMOVERT i MICROMASTER po dwa słowa: słowo sterujące i prędkość zadaną, a odbiera dwa słowa z napędu SIMOVERT i osiem słów z napędu MICROMASTER. Słowa odbierane z napędu SIMOVERT są w tym przypadku mało istotne. Wszystkie interesujące nas informacje znajdują się w napędzie MICROMASTER. Musimy zatem tak skonfigurować ten napęd, aby siecią PROFIBUS były wysyłane żądane sygnały do sterownika PLC. Dane PZD wysyłane z przemiennika MICROMASTER są odbierane przez przemiennik SIMOVERT. Mechanizm ten wykorzystuje transmisję SLAVE-to-SLAVE. W ten sposób przemiennik SIMOVERT MD VC cyklicznie odczyta wysyłane słowa z napędu MICROMASTER. Dane PZD zostaną po odbiorze przez bufor karty CUV C przemiennika SIMOVERT zapisane w rejestratorze Trace i mogą być następnie poddane obróbce cyfrowej.

Na rysunku 18 przedstawiono zarejestrowane przebiegi rozruchowe pracy silnika indukcyjnego zasilanego z Micromaster 440. W połowie cyklu nastąpiła zmiana obciążenia na wale silnika. Zauważamy wzrost prądu pobieranego przez silnik oraz zmniejszenie częstotliwości wyjściowej. Zmienia się także częstotliwość wyjściowa, co widać wyraźnie w przebiegach fazowego prądu chwilowego. Analizując przebieg prądu wyjściowego również rozdzielimy stan rozruchu i generacji składowej I_{sd} , a następnie zmianę modeli i pracę składowej I_{sq} .



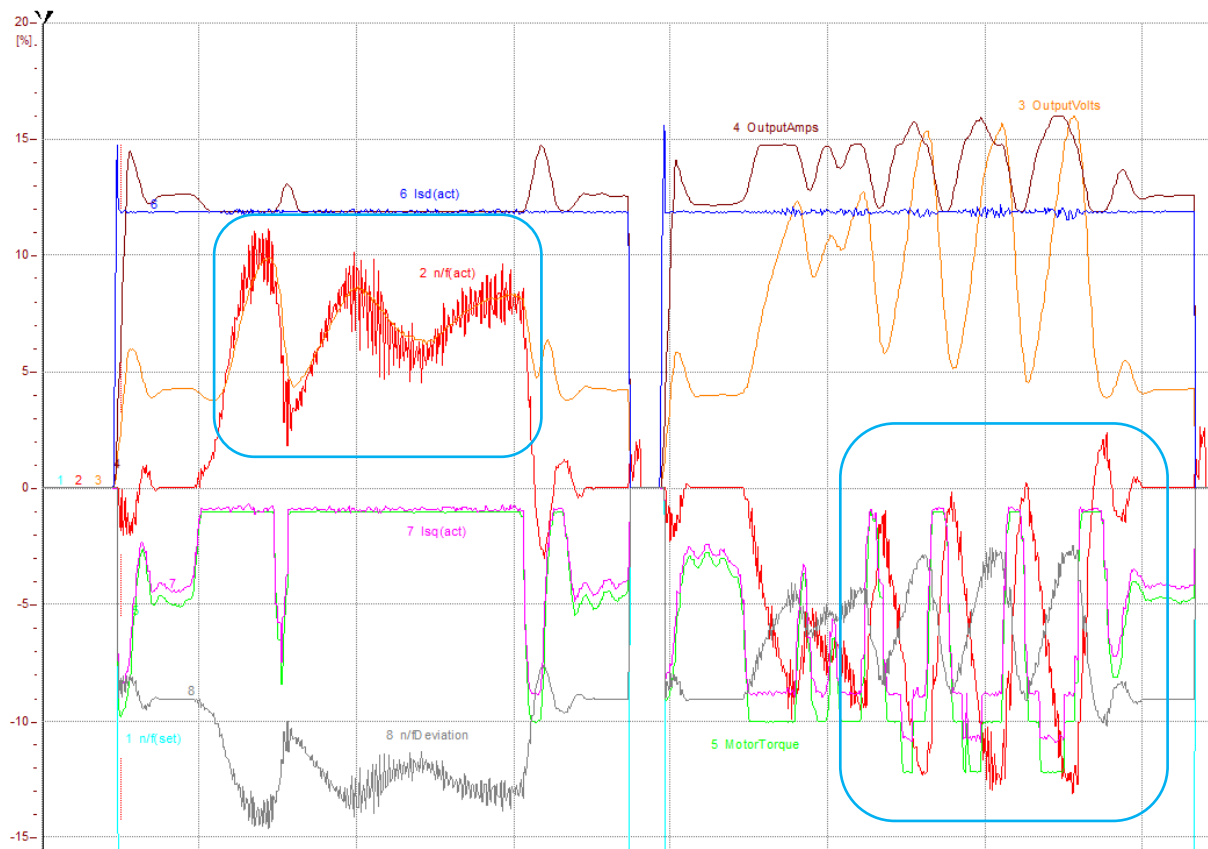
Rys. 18. Rejestracja przebiegów elektromechanicznych podczas zmiany obciążenia silnika zasilanego z przekształtnika MICROMASTER 440 [11]

Dzięki poprawnej konfiguracji możemy dokonać rejestracji zarówno rozruchu, jak również pracy napędu VFD podczas cyklu wydobywczego oraz monitorować całodobowo zmiany wielkości elektromechanicznych. Narzędzie będzie pomocne w doborze nastaw regulacji oraz diagnostyce układu sterowania.

Zaproponowana metoda pozwala na uzyskanie alternatywnego narzędzia diagnostycznego nie tylko dla napędów produkcji Siemens. Dotyczy ona szczególnie przypadku takiej konfiguracji, gdy w sieci PROFIBUS mamy zainstalowane napędy różnych producentów i choćby jeden napęd SIMOVERT/SINAMICS, które pozwolą na rejestrację i wyświetlanie danych procesowych PZD. Takie narzędzie ma duże znaczenie dla serwisu i działań prewencyjnych. Jest też bardzo pomocne w przypadku optymalizacji nastaw parametrów regulacji i zastosowaniach niestandardowych, jak również pozwala na lepsze zrozumienie algorytmów sterowania w systemach napędowych różnych producentów [4].

8. Diagnostyka napędów elektromechanicznych maszyn górnictwa odkrywkowego za pomocą metod i narzędzi wykorzystujących cyfrowe algorytmy sterowania

Na rysunku 19 przedstawiono przebiegi wielkości charakterystycznych VFD dla SIMOVERT MD VC oraz sterowanego silnika, zarejestrowane w module Trace za pomocą oprogramowania DriveMonitor firmy Siemens. Przebiegi pozwalają dokonać diagnostyki pod względem nastaw parametrów schematu zastępczego oraz nastaw regulacji napędu VFD.



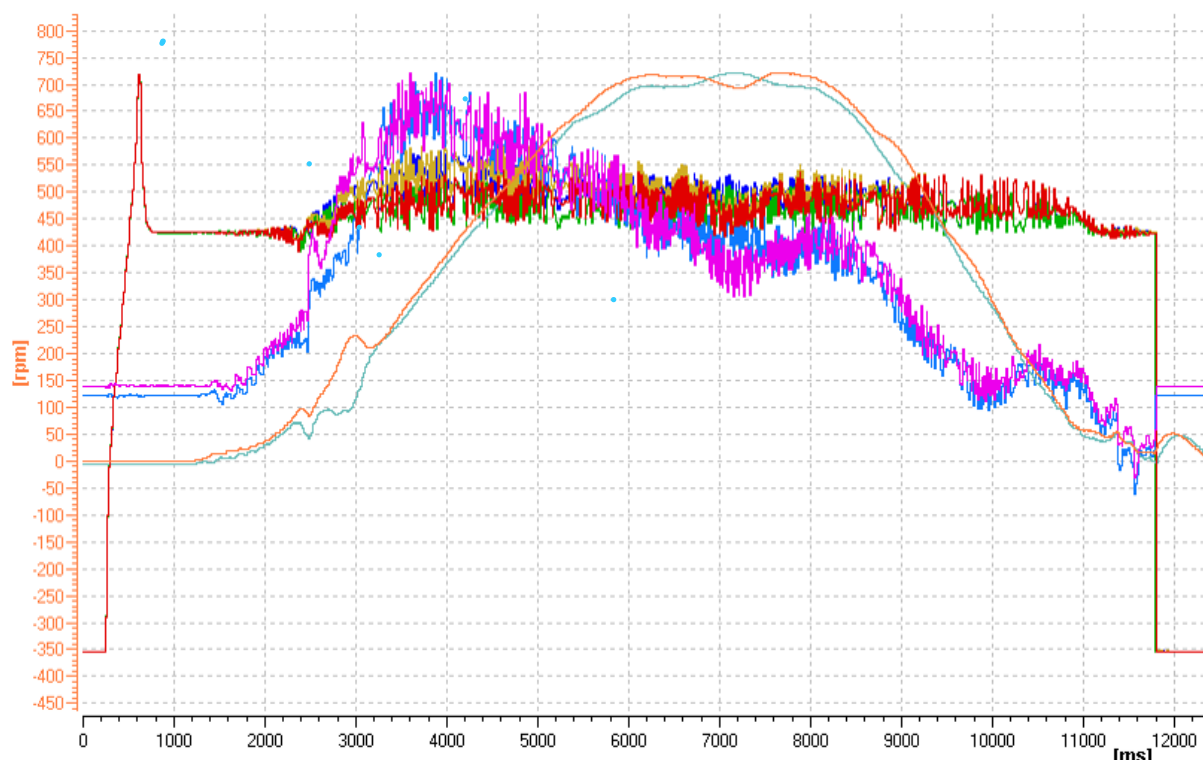
Rys. 19. Przebiegi procesu rozruchu silnika o mocy $P_N = 160$ kW zainstalowanym w aplikacji kopalnianej: algorytm wektorowy FOC ze sprzężeniem prędkościowym, rejestracja za pomocą DriveMonitor [12]

Rysunek 19 przedstawia cykl pracy silnika, gdzie:

- przebieg nr 1 to prędkość zadana, podana w % prędkości synchronicznej (k. turkusowy),
- przebieg nr 2 to prędkość aktualna, podana w % prędkości synchronicznej (k. czerwony),
- przebieg nr 3 to napięcie silnika, podane w % napięcia znamionowego (k. pomarańczowy),
- przebieg nr 4 to prąd silnika, podany w % prądu znamionowego (k. brązowy),
- przebieg nr 5 to moment silnika, podany w % momentu znamionowego (k. zielony),
- przebieg nr 6 to składowa I_{sd} (strumień), podana w % prądu znamionowego (k. niebieski),
- przebieg nr 7 to składowa I_{sq} (moment), podana w % prądu znamionowego (k. purpurowy),
- przebieg nr 8 to uchyb regulacji, podana w % prędkości synchronicznej (k. szary).

Z uwagi na widoczne drgania i oscylacje, dla wprawnego specjalisty napędów VFD, z rysunku 19, wynika konieczność weryfikacji nastaw prądu magnesującego, nastaw regulatora prędkości oraz wybranego algorytmu sterowania.

Na rysunku 20 przedstawiono przebiegi wielkości charakterystycznych VFD dla SINAMICS G150 oraz sterowanego silnika, zarejestrowane w module Trace za pomocą oprogramowania STARTER firmy Siemens. Przebiegi pozwalają dokonać diagnostyki pod względem nastaw parametrów schematu zastępczego oraz nastaw regulacji napędu VFD.



Rys. 20. Zestawienia przebiegów procesu rozruchu silnika o mocy $P_N = 160$ kW zainstalowanym w aplikacji kopalnianej: algorytm wektorowy FOC ze sprzężeniem prędkościowym, rejestracja za pomocą STARTER [10]

Na rysunku 20 i w tabeli 1 przedstawiono wielkości zarejestrowane podczas cyklu pracy rozruchu i zatrzymania napędów VFD z dwoma silnikami indukcyjnymi pracującymi w napędzie jazdy.

Wielkości zarejestrowane podczas cyklu pracy rozruchu i zatrzymania napędów VFD z dwoma silnikami indukcyjnymi pracującymi w napędzie jazdy [10]

Tabela 1

Wielkość zarejestrowana podana w [%] danej znamionowej:	Silnik nr 1 kolor krzywej	Silnik nr 2 kolor krzywej
prędkość aktualna w % prędkości synchronicznej	pomarańczowy	błękitny
prąd silnika w % prądu znamionowego	granatowy	jasno-zielony
składowa I_{sd} (strumień) w % prądu znamionowego	czerwony	zielony
składowa I_{sq} (moment) w % prądu znamionowego	fuksja	jasno-niebieski

Z uwagi na widoczne drgania i zmianę składowej I_{sd} po rozruchu, dla wprawnego specjalisty napędów VFD, z rysunku 20, wynika konieczność weryfikacji nastaw modelu zastępczego silnika, nastawy prądu magnesującego, nastaw regulatora prędkości oraz wybranego algorytmu sterowania. Długie opóźnienia w pętach sprzężenia zwrotnego mogą spowodować chwilowe utraty stabilności układów regulacji MGO, a drgania i oscylacje mogą skutkować częstymi uszkodzeniami elektromechanicznymi. Zastosowanie sterowania źle dobranego do obiektu regulacji może powodować również zagrożenie dla pracy ludzi i działania maszyn MGO.

9. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i zgromadzonych doświadczeń autorzy zaproponowali możliwość efektywnego wykorzystania narzędzi wbudowanych w strukturę zarządzania pracą

komercyjnych napędów VFD dla wybranych algorytmów sterowania z silnikami indukcyjnymi. Do dyspozycji przeszkolonego użytkownika pozostają narzędzia i metody w dziedzinie czasu i częstotliwości, do diagnozowania napędów VFD stosowanych w MGO. Diagnostyka cyfrowa napędów elektromechanicznych pozwala zarówno służbom utrzymania ruchu, jak również badaczom na:

- Wykonywanie raportów stanu zerowego, po oddaniu maszyn do ruchu i ciągłą weryfikację - raporty z uruchamiania z podaniem zidentyfikowanych parametrów zastępczych, metod doboru nastawy regulacji i doboru algorytmu oraz zarejestrowanymi charakterystykami ruchowymi.
- Monitoring najważniejszych wielkości charakterystycznych dla napędów VFD i silników IM.
- Przeprowadzanie audytów rozpoznawczych i kontrolnych pod względem oceny zachowania się układu podczas pracy wydobywczej.
- Przeprowadzanie okresowych rejestracji dla MGO, które były uruchomiane w oparciu o falownikową technikę napędową – działania kontrolne i prewencyjne.
- Wykonywanie analiz awarii czy uszkodzeń zespołów elektromechanicznych, pojawiających się na obiektach
- Wykonywanie rejestracji charakterystyk rozruchowych z weryfikacją otrzymanych danych w dziedzinie czasu i częstotliwości.
- Weryfikację opóźnień powstających w pętlach regulacji np. sprzężenia zwrotnego, które mogą powodować utratę stabilności regulacji układów napędowych MGO.
- Dokonanie weryfikacji zidentyfikowanych parametrów schematu zastępczego i nastaw prądu magnesującego oraz nastaw regulatorów z poziomem ograniczeń.
- Weryfikację zmian w oprogramowaniu np. adaptację nastaw uwzględniających pory roku i zmiany parametrów podłoża oraz parametrów zastępczych silników napędowych.
- Monitorowanie poprawy właściwości regulacyjnych (uwzględnienie zmian parametrów silnika pod wpływem temperatury), w ekstremalnych warunkach pracy urządzenia.
- Weryfikację właściwego doboru pod względem mocy dla systemów napędowych oraz wartości granicznych zarówno dla stanów statycznych, jak również dynamicznych.
- Optymalizację zużycia energii elektrycznej napędów VFD i silników poprzez właściwy dobór algorytmu do obiektu i właściwą parametryzację z doбором nastaw i monitorowaniem zmian.

Dla newralgicznych maszyn, sugerujemy zastosowanie np. dodatkowych urządzeń rejestrujących za pomocą sieci PROFIBUS lub PROFINET, które będą pełniły rolę akwizytora danych, co pozwoli na wykonywanie rejestracji roboczych i zbudowanie bazy danych i opracowanie środków zaradczych [11].

Podsumowując, możliwość cyfrowej diagnostyki pracy napędów VFD, pod względem jakości regulacji z uwzględnieniem nastaw parametrów odwzorowujących model silnika i podstawowe cechy zespołu napędowego jest kwestią bardzo ważną dla maszyn MGO. Nie możemy tutaj jednak wyłącznie bazować na procedurach tzw. auto-tuningu, czy automatycznej identyfikacji, bez stosownej wiedzy pozwalającej na weryfikację otrzymanych danych, gdyż tak skonfigurowane maszyny będą stanowiły realne zagrożenie w dalszej eksploatacji. Opisywane zagadnienia wymagają wiedzy, doświadczenia, stosownych podstaw naukowo-technicznych, a przede wszystkim wyobraźni, cierpliwości i odpowiedzialnego podejścia do sterowania maszyn, w których każda niewłaściwie wykonana może skutkować poważną awarią lub uszkodzeniem maszyny czy nawet systemu MGO.

Literatura

1. Jabłoński M.: Algorytmy sterowania napędem elektrycznym w realizacjach aplikacyjnych z zastosowaniem współczesnej techniki falownikowej. Biuletyn Techniczno-Informacyjny Oddziału Łódzkiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Nr 2/2020 (89), Wrzesień 2020, ISSN 2082-7377



2. Dokumentacja i katalogi SIEMENS dla SIMOVERT MASTERDRIVES VC, MICROMASTER 420, 440, SINAMICS S120, S150, G120, G150
3. Blaschke F.: „Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronenmaschine“. Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte, Vol. 1, pp. 184-193, 1972
4. Jabłoński M., Grasewicz P.: Diagnostyka napędów w sieci PROFIBUS. MASZYNY, TECHNOLOGIE, MATERIAŁY - TECHNIKA ZAGRANICZNA - e-zeszyt (pdf) 2006-2
5. Jabłoński M.: Analiza parametrów funkcyjnych oraz modyfikacja algorytmów sterowania polowozorientowanego napędu falownikowego z silnikiem indukcyjnym. Praca doktorska, PŁ 2006
6. Błaszczuk Ł., Jabłoński M.: Konfiguracja, diagnostyka i wymiana danych procesowych w teleinformatycznych sieciach przemysłowych. Technika zagraniczna maszyny, technologie, Mat. Sigma-Not
7. Uchroński Ł., Jabłoński M.: Wymiana danych procesowych w aplikacjach przemysłowych. Technika zagraniczna maszyny, technologie, materiały Sigma-Not
8. Jabłoński M., Borkowski P.: Industrial implementations of control algorithms for voltage inverters supplying induction motors. ARCHIVES OF ELECTRICAL ENGINEERING. VOL. 70(2), pp. 475–491 (2021)
9. Jabłoński M., Anuszczyk J.: Współczesne algorytmy sterowania maszyn górnictwa odkrywkowego w przykładach aplikacyjnych. VII Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego 2011 „Węgiel Brunatny - Energia - Rozwój”
10. Jabłoński M., Machtałowicz S., Krajewski P.: Rola i znaczenie profili aplikacyjnych PROFIdrive w świetle nowoczesnych rozwiązań przeznaczonych do zastosowania w systemach napędów urządzeń górnictwa odkrywkowego. Instytut Górnictwa Odkrywkowego "Poltegor-Instytut". Czasopismo Górnictwo Odkrywkowe. Rocznik 2008. Tom R. 49/2, nr 6. Strony 70-75
11. Jabłoński M.: II Konferencja Naukowo-Techniczna Elgor 2007. Napędy urządzeń górnictwa odkrywkowego: Optymalizacja struktur sterowania nowoczesnych napędów elektrycznych na przykładzie Sinamics S120
12. Jabłoński M., Borkowski P.: Wymiana systemów sterowania wraz z implementacją cyfrowej falownikowej techniki napędowej w maszynach górnictwa odkrywkowego, KOMTECH 2020, ISBN 978-83-65593-22-1