

*Jan Anuszczyk**, *Mariusz Jabłoński***

BADANIA ELEKTROMECHANICZNYCH ZESPOŁÓW NAPĘDOWYCH ZWAŁOWARKI ZGOT

1. Wprowadzenie

Podstawą badań przedstawionych w pracy jest analiza algorytmów sterowania wektorowego zaimplementowanych w oprogramowaniu układów przekształtnikowych przeznaczonych do sterowania napędami jazdy oraz procesy przejściowe zachodzące w elektromechanicznych zespołach napędowych z silnikami indukcyjnymi zainstalowanymi w układzie napędów jazdy gąsienic podawarki (część zwałowarki). Analizowanymi układami przekształtnikowymi była zastosowana do sterowania napędami gąsienic jazdy zwałowarki ZGOT, seria falowników SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control firmy SIEMENS [7]. Dla potrzeb powstającej aplikacji, w oprogramowaniu karty sterującej pracą przekształtnika (CUVC), zastosowano rozwiązania modyfikujące bezczujnikowe algorytmy sterowania napędami gąsienic jazdy podawarki. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że poprzez modyfikację wewnętrznej struktury oprogramowania układu przekształtnikowego SIMOVERT można znacznie ograniczyć zjawiska niepożądane występujące w trakcie cyklu roboczego takie jak udary i oscylacje momentu oraz prędkości, szczególnie w obszarze pracy przy niskich prędkościach obrotowych zastosowanych silników oraz znacznie ułatwić realizację procesu rozruchu.

2. Charakterystyka obiektu

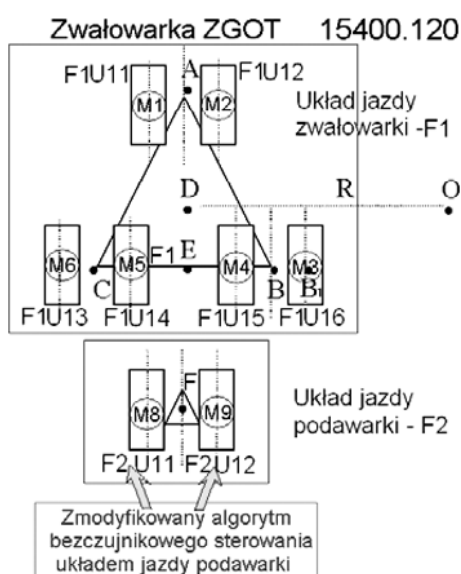
Zwałowarka ZGOT 15400.120 należy do grupy największych samojezdnych zwałowarek stosowanych w światowym górnictwie odkrywkowym o wydajności dobowej 260 tys. m³, ($Q = 15\,400\text{ m}^3/\text{h}$) i promieniu zwałowania 120 m. Parametry techniczno-technologiczne tej

* Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka, Łódź

** Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka, Łódź

zwałowarki, jej zakresy pracy i szczegóły osiągow, a także ocenę poziomu bezpieczeństwa, stateczności i niezawodności eksploatacyjnej zaprezentowano w pracach [3 i 4].

W układzie jezdnym zwałowarki ZGOT jest zainstalowanych sześć silników indukcyjnych Sgm315M6B o mocy $P_N = 110$ kW przeznaczonych do realizacji jazdy części zwałowarki oraz dwa silniki indukcyjne Sgm315M6B o mocy $P_N = 110$ kW do realizacji jazdy podawarki. Aktualnie wszystkie silniki układu jazdy podawarki pokazane na rysunku 1, posiadają zamknięte sprzężenia zwrotne prędkościowe realizowane za pomocą przetworników impulsowych. Natomiast w pierwszej wersji projektu silniki w układzie jazdy podawarki nie posiadały zamkniętego prędkościowego sprzężenia zwrotnego.

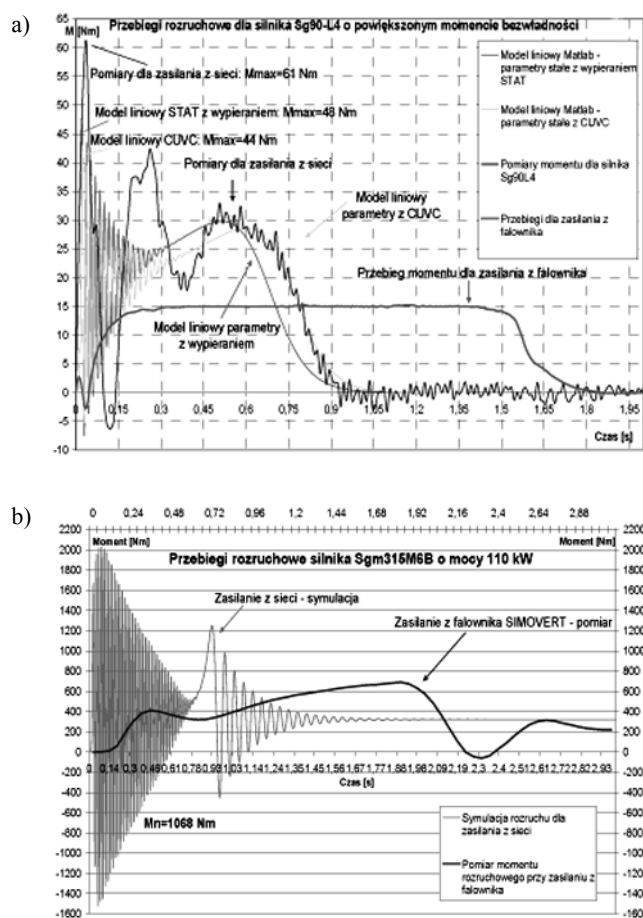


Rys. 1. Schemat układu jezdnych zwałowarki ZGOT 15400.120. Oznaczenia układu jezdnych (F1 — zwałowarka; F2 — podawarka): F1U11, F1U12, F1U13, F1U14, F1U15, F1U16 — układy gąsienic jazdy zwałowarki; F2U11, F2U12 — układy gąsienic jazdy podawarki; Silniki: M1, M2, M3, M4, M5, M6 — silniki indukcyjne napędzające gąsienice zwałowarki, (moc napędów 6×110 kW); M8, M9 — silniki indukcyjne napędzające gąsienice podawarki — tej części dotyczy modyfikacja algorytmu sterowania, (moc napędów 2×110 kW)

3. Wyniki badań

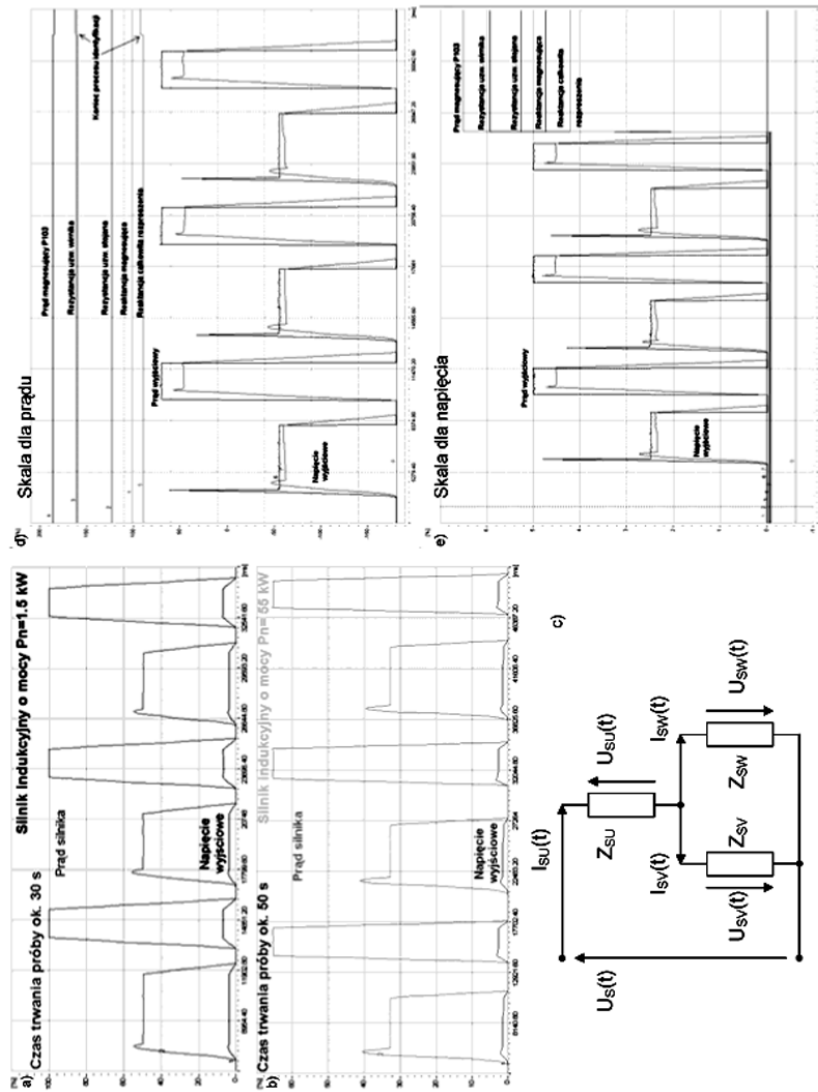
Z praktyki przemysłowej wiadomo, że uszkodzenia czy też zakłócenia w pracy wykorzystywanych przetworników impulsowych są bardzo częstymi przypadkami. Zaproponowane rozwiązanie, które zostało sprawdzone i funkcjonowało na obiekcie zwałowarki przez okres co najmniej kilku miesięcy, pozwala na przełączanie konfiguracji układu pracy z wektorowej regulacji w układzie zamkniętym (obecnie zastosowany algorytm — r4) na bez-

czujnikowe sterowanie wektorowe w układzie otwartym (zastosowany pierwotnie algorytm — $r3$) [7]. Wprowadzona modyfikacja bezczujnikowego algorytmu sterowania skutkuje wyraźną poprawą dynamiki napędu w zakresie niskich częstotliwości zadanych (prowadzona regulacja jest regulacją prądu silnika, a nie regulacją prędkości obrotowej). Rozwiązanie to daje możliwość korekty dynamiki układu szczególnie przy rozruchu i hamowaniu. Punktem wyjścia w badaniach doświadczalnych są charakterystyki momentu rozruchowego silników podane na rysunku 2 [2].



Rys. 2. Przebiegi momentu rozruchowego dla silników zasilanych bezpośrednio z sieci oraz z przekształtnika: a) silnik Sg90L4 o mocy $P_N=1,5$ kW — laboratorium; b) silnik Sgm315M6B o mocy $P_N=110$ kW — zwałowarka ZGOT

W przypadku napędów przemysłowych ciągła zmiana ich stanu pracy (rozruchy, hamowanie, zmiana obciążenia, zmiana wartości zadanej) jest elementem nieodłącznym.



Rys. 3. Identyfikacja parametrów modelu zastępczego silnika w stanie nieruchomego wirnika: a) identyfikacja parametrów dla silnika 1,5 kW; b) identyfikacja parametrów dla silnika 55 kW; c) układ połączeń uzwojeń fazowych silnika podczas próby; d) zmiana identyfikowanych parametrów silnika Sg90L4 dla nastawy prądu magnesującego $I_m = 0\%$; e) zmiana identyfikowanych parametrów silnika Sg90L4 w przypadku zerowych warunków początkowych [2]

Bardzo ważnym elementem, który ma decydujący wpływ na dynamikę układu jest konieczność zapewnienia regulacji prądu w pierwszych chwilach po załączeniu napędu oraz dodatkowo stworzenie możliwości regulacji w tym czasie prędkości obrotowej silnika indukcyjnego. Podczas oceny przebiegów elektromechanicznych silników napędowych zespołu jazdy układu podawarki, pomimo początkowego wprowadzenia na wejście algorytmu przekształtnika stałej wartości zadanej, zauważamy powstawanie charakterystycznych oscylacji w przebiegach prędkości, które są szczególnie niebezpieczne dla układu mechanicznego. Podczas normalnej pracy układu jazdy podawarki, w przypadku zastosowania bezczujnikowego algorytmu sterowania, zagadnienia związane z samą pracą zastępczych modeli zastosowanego silnika oraz ich zakresem działania (model prądowy, model SEM), ukazują się jako zagadnienia podstawowe [2, 5]. Z tego względu należy 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. Do tego celu, w analizowanych układach przekształtnikowych SIMOVERT, producent urządzenia — firma SIEMENS, wbudowała procedury identyfikacji parametrów przyłączanych do przekształtnika silników indukcyjnych. Do dyspozycji użytkownika są także nowoczesne metody optymalizacji nastaw parametrów regulatorów, które są identyfikowane na podstawie wyników pomiarów testujących. Identyfikacja odbywa się m.in. na podstawie zarejestrowanych przebiegów wielkości, które są odpowiedzią na zadane wymuszenie. Przed uruchomieniem procedury należy dokładnie rozpoznać układ napędowy (specyfikę maszyny, przekształtnik, silnik, mechanikę, obciążenie). Do systemu sterowania pracą algorytmu należy wprowadzić dane znamionowe przekształtnika i silnika, a następnie należy wykonać „automatyczną” parametryzację. W zależności od wybranej wartości parametru, są obliczane podstawowe parametry silnika i nastaw regulatorów (prędkości, prądu stojana) dla dostępnych algorytmów sterowania napędem. Parametry schematu zastępczego typu T silnika są identyfikowane z dokładnością techniczną na podstawie wyników pomiarów wykonywanych przy nieruchomym wirniku, [1, 6]. Próba jest podyktowana względami eksploatacyjnymi, ponieważ w wielu przypadkach zachodzi potrzeba, aby wirnik silnika podczas testów pozostawał nieruchomy lub nie można układu rozprzęgnąć. Dla przypadków, gdy istnieje możliwość wykonania obrotu wirnika dla potrzeb testu, wykonywana jest próba identyfikacji parametrów silnika w stanie bez obciążenia. W tym przypadku są mierzone parametry gałęzi poprzecznej schematu zastępczego silnika (reaktancja magnesująca, prąd stanu jałowego). Pozwala to na optymalne określenie składowej I_{sd} prądu stojana, co jest szczególnie ważne przy wykorzystywaniu algorytmów sterowania wektorowego [5].

4. Modyfikacja algorytmu sterowania

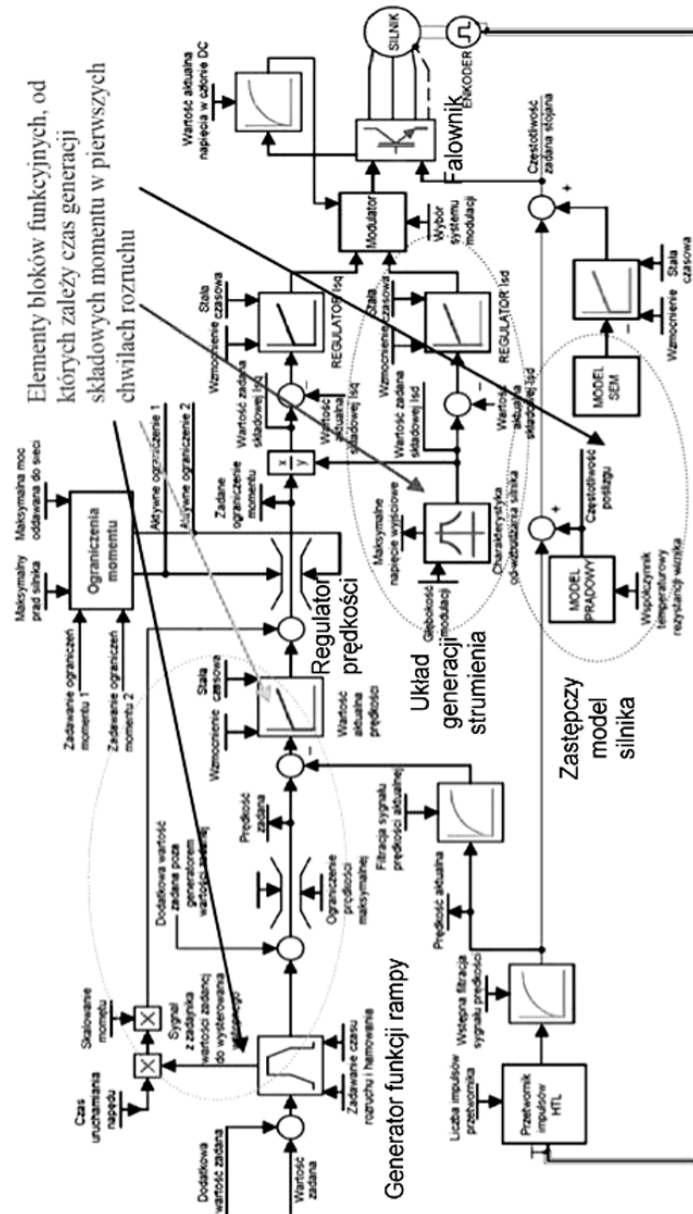
Koncepcja modyfikacji bezczujnikowego algorytmu sterowania polowo-zorientowanego napędu falownikowego SIMOVERT MASTERDRIVES polega na wprowadzeniu dodat-

kowego regulatora do toru układu zadawania prądu przez co uzyskano zamknięcie wewnętrzne sprzężenia zwrotnego w torze regulacji prędkości [2]. Zaproponowana koncepcja została zweryfikowana w warunkach laboratoryjnych oraz na przykładzie napędów jazdy układu podawarki zwałowarki ZGOT pracującej na polu odkrywki Szczerców Kopalni KWB „Bełchatów”

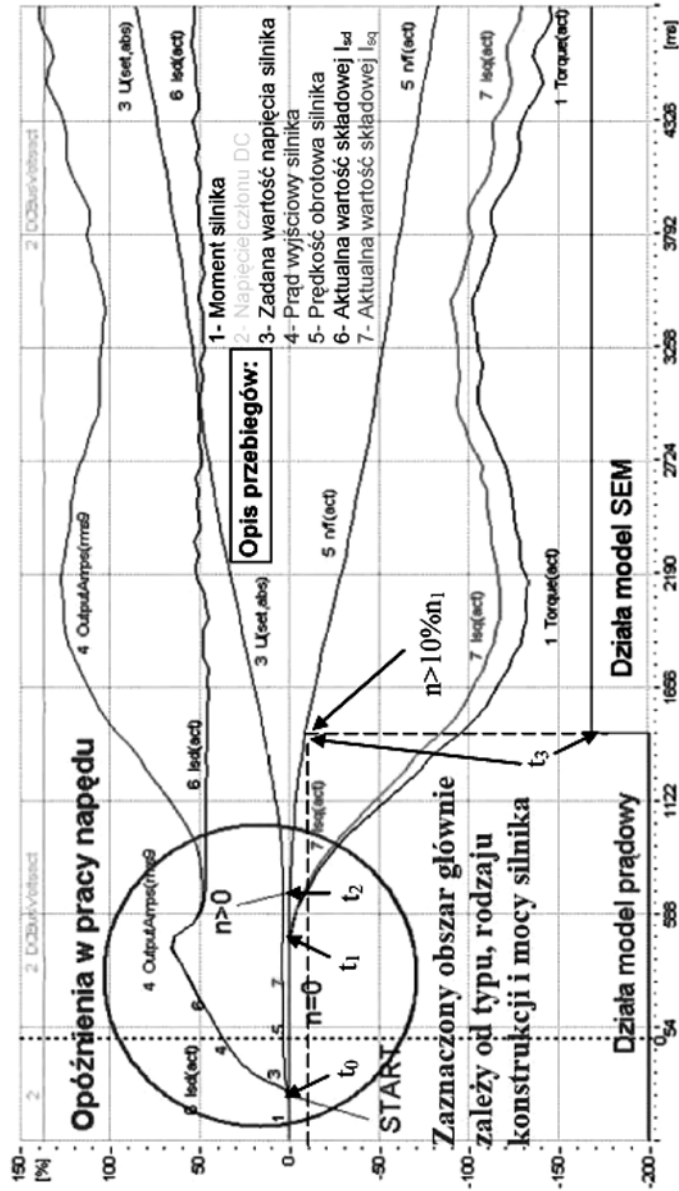
Dla przypadku zastosowanego w pracy rozwiązania, wartość prądu na schemacie z rysunku 4 jest obliczana w zaprogramowanym układzie prądowym z zamkniętym sprzężeniem zwrotnym, za pomocą składowej całkującej regulatora SEM [2]. Układ zaprogramowano w ten sposób, aby w podanych zakresach częstotliwości zadanej, gdy działa układ zadawania prądu oraz model napięciowy, algorytm sterujący pracą przekształtnika pracował w układzie ze zmodyfikowaną strukturą algorytmu. Zapewniło to bardzo dobre parametry rozruchowe oraz pozwoliło na kontrolowaną pracę napędu (prąd, moment, prędkość) pracującego w bezczujnikowym algorytmie sterowania od początku procesu rozruchowego (tzn. od $n = 0$). Analiza diagramu blokowego z rysunku 4, jako przykładu funkcjonowania algorytmu sterowania wektorowego w układzie z zamkniętym prędkościowym sprzężeniem zwrotnym, pozwala zauważyć, że po załączeniu przekształtnika pojawiają się opóźnienia w pracy napędu (rys. 5). Opóźnienia te zaznaczono obszarem na rysunku i wynikają one głównie z rodzaju oraz typu konstrukcji silnika indukcyjnego, a także z ograniczeń funkcyjnych wybranego algorytmu sterowania wektorowego. Na podstawie pomiarów testujących przeprowadzonych dla silnika o mocy $P_N = 37$ kW można stwierdzić, że proces ustalania się stanu elektromagnetycznego tego silnika trwa około $\Delta t_w = 0,9$ 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, parametr P103). 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.

Wymaga się, 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 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 predefiniowana, parametr P103).

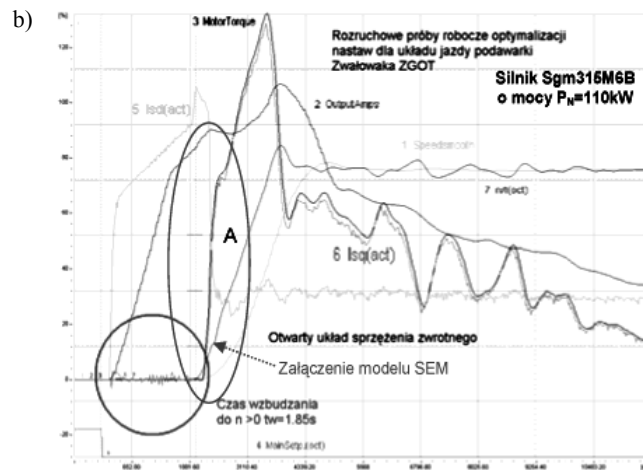
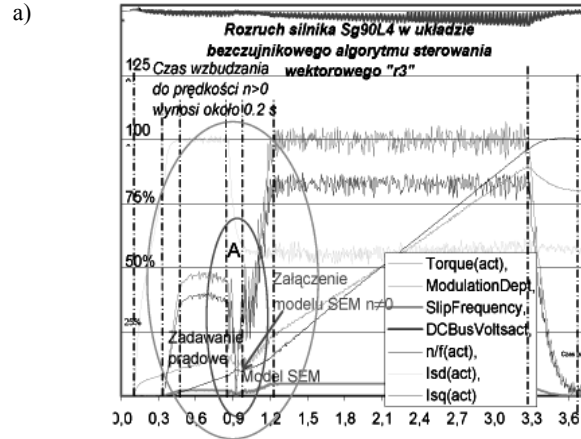
Z analizy poszczególnych bloków funkcyjnych wybranego algorytmu sterowania zauważamy, że istnieje możliwość zmiany fabrycznej nastawy „czasu wzbudzenia” generacji składowej I_{sd} a przy tym skrócenia czasów opóźnień, a także przyspieszenia reakcji silnika po załączeniu przekształtnika.



Rys. 4. Schemat funkcjonowania wektorowego algorytmu sterowania napędem SIMOVERT z czujnikiem prędkości dla aplikacji przemysłowej napędów jazdy podawarki [2]



Rys. 5. Charakterystyki rozruchowe silnika pracującego w konfiguracji algorytmu wektorowego ze sprzężeniem zwrotnym prędkościowym, silnik o mocy $P_N = 37$ kW



Rys. 6. Przebiegi rozruchowe układów napędowych z zastosowanym algorytmem bezczujnikowym „r3”: a) silnik o mocy $P_N = 1,5 \text{ kW}$ — laboratorium; b) silnik o mocy $P_N = 110 \text{ kW}$ — zwałowarka ZGOT

Wykonane badania, dotyczące zastosowania bezczujnikowych algorytmów sterowania do silników indukcyjnych o różnych mocach, pozwalają zauważyć odmiennosc przebiegów i uzyskanych charakterystyk od tych, które zarejestrowano dla napędów pracujących z wektorowym algorytmem i czujnikiem prędkości (rys. 6). Zauważamy także pewne opóźnienia zjawisk zachodzących w procesie rozruchowym: dla silnika $P_N = 1,5 \text{ kW}$ „czas wzbudzenia” wynosi 0,3 s, natomiast dla silnika $P_N = 110 \text{ kW}$ „czas wzbudzenia” wynosi 1,85 s. Dodatkowo, podczas typowego cyklu roboczego aplikacji dotyczącej np. napędów jazdy zwałowarki ZGOT, występują ciągle zmiany poziomu wartości zadanej, co wymusza konieczność nieustannych przełączeń pomiędzy wymienionymi modelami zastępczymi.

5. Podsumowanie

Zastosowane rozwiązanie pozwala na znaczną redukcję oscylacji w przebiegach momentu, prędkości i prądu silnika przy jeździe na wprost dla obu gąsienic podawarki F2. Osiągane wartości maksymalne prądu nie przekraczają wartości dopuszczalnych i są mniejsze od tych jakie notowano podczas pracy ze standardowym algorytmem. Rozwiązanie pozwoliło na wyeliminowanie błędów zwałowarki ZGOT, związanych z przekraczaniem ograniczenia prądowego. Badania wykonane w uznanych za najtrudniejsze warunkach pracy urządzenia podawarki: jazda po łuku oraz skręt w miejscu po zadanej krzywej, pozwoliły także na stwierdzenie poprawy dynamiki układu oraz ograniczenie oscylacji momentu i prędkości dla niskich wartości zadanych. Pozytywne rezultaty zastosowanego rozwiązania pozwalają na stwierdzenie, że istnieje możliwość modyfikacji algorytmu sterowania napędem pod kątem poprawy jego charakterystyk dynamicznych przy prędkościach bliskich zeru. Badania zakończyły się wdrożeniem przemysłowym opracowanych algorytmów sterowania.

LITERATURA

- [1] *Anuszczyk J.*: Maszyny elektryczne w energetyce. WNT, Warszawa, 2005
- [2] *Jabłoński M.*: Analiza parametrów funkcyjnych oraz modyfikacja algorytmów sterowania polowo-zorientowanego napędu falownikowego z silnikiem indukcyjnym. Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki Elektroniki Informatyki i Automatyki PŁ, Łódź, 2006, (Promotor: Anuszczyk J., prof. PŁ)
- [3] *Kanczewski P., Kowalczyk P.*: Zwałowarka ZGOT-15400.120 pierwszy polski 200-tysięcznik. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr. III Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego, Bełchatów, 2002, 213–221
- [4] *Kowalczyk M., Wocka N. i in.*: Zwałowarka ZGOT-15400.120 — maszyna nowej generacji przekazana do eksploatacji w KWB Bełchatów S.A. O/Szczerców. Górnictwo Odkrywkowe, Vol. 47, nr 1, Instytut Górnictwa Odkrywkowego Poltegor-Instytut, 2005, 5–13
- [5] *Orłowska-Kowalska T.*: Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi. Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław, 200
- [6] *Paszek W.*: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Helion, Gliwice, 1998
- [7] *Siemens A.G.*: Kompendium sterowania wektorowego dla układów napędowych SIMOVERT MASTERDRIVES VECTOR CONTROL. Automation and Drives (A&D). Variable-Speed Drive Systems. Erlangen, 2001