

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.14>

Metody poprawy algorytmów sterowania systemów napędów maszyn górnictwa odkrywkowego

Mariusz Jabłoński - Katedra Aparatów Elektrycznych, Politechnika Łódzka

Piotr Borkowski - Katedra Aparatów Elektrycznych, Politechnika Łódzka

Streszczenie: Rozdział opisuje zagadnienia dotyczące implementacji cyfrowych, skalarnych i wektorowych, algorytmów sterowania przemiennikową techniką napędową w maszynach górnictwa odkrywkowego. Na bazie wykonanych badań i zebranych doświadczeń, poruszone zostaną kwestie związane z problemami, jakie ujawniają się w trakcie eksploatacji. Szczególnie dotyczy to wymiany przekształtnikowych rozwiązań techniki analogowej prądu stałego na przemiennikową (falowniki) technikę cyfrową prądu przemiennego oraz retrofityczną wymianę przemienników techniki prądu przemiennego do współczesnych rozwiązań, bez stosownej weryfikacji modelowej i obliczeniowej. Napędy te sterują silnikami indukcyjnymi odpowiedzialnymi za napędy jazdy, obrotu, zwodzenia i podnoszenia, a zainstalowane systemy wykorzystują różne algorytmy sterowania silnikami (skalarne i wektorowe) i mogą pracować indywidualnie (np. falownik steruje pracą silnika jazdy i wymienia dane pomiędzy pozostałymi napędami a systemem) lub grupowymi (jeden falownik steruje kilkoma silnikami lub falowniki pracują w układzie Master-Slave np. napędy obrotu). Poza prawidłowym doбором wielkości mocy silników i przemienników (konieczne stosowne przewymiarowania), uwzględniających trudne i szybko zmieniające się warunki podłoża oraz zmiany pogody, bardzo ważne są zaimplementowane w przemiennikach algorytmy sterowania strukturami układów napędowych z regulatorami PID. W zależności od wybranej konfiguracji do realizacji zadań, system musi otrzymać stosowny zbiór właściwych parametrów wejściowych (model silnika, nastawy ograniczeń i regulatorów), a dobór nastaw regulacji jest tutaj jednym z najważniejszych zagadnień w działaniu całej maszyny. Nieprawidłowe ustawienia mogą być niebezpieczne dla obsługi i działania całej maszyny oraz mogą skutkować wieloma zjawiskami negatywnymi, jak np. szarpania czy drgania podczas pracy maszyny, co może skutkować pękaniem konstrukcji oraz wieloma niepotrzebnymi przestojami związanymi z uszkodzeniami mechanicznymi.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, falownik, algorytm sterowania, model silnika, maszyna górnictwa odkrywkowego

Possibilities of improving the control algorithms of electric drives for opencast mining machines

Abstract: The chapter describes issues related to digital, scalar and vector implementations of control algorithms using the converter drive technology in opencast mining machines. On the basis of tests and experience gained, issues related to the problems that emerge during operation will be discussed. This particularly applies to the replacement of converter solutions of analogue direct current technology with the converter (inverters) of digital alternating current technology and retrofit replacement of alternating current technology converters to state-of-the-art solutions, but without appropriate model and computational verification. These drives control induction motors, responsible for the travel, rotation, thaw and lifting drives, as well as the installed systems use various motor control algorithms (scalar and vector) and can work individually (e.g. the inverter controls the operation of the drive motor and exchanges data among other drives and the system) or in group (one inverter controls several motors or the inverters work in a Master-Slave system, e.g. rotation drives). In addition to the correct selection of the power range of motors and converters (adequate oversizing is necessary), taking into account difficulties and rapidly changing ground conditions and weather changes, the algorithms for controlling the structure of drive systems with PID controllers implemented in the converters are very important. Depending on the selected configuration for the implementation of tasks, proper set of input parameters (engine model, limit settings and regulators) must be entered to the system, and the selection of control settings is here one of the most important issues during operation of the machine. Incorrect settings may be dangerous for the operation of the machine and may result in many negative phenomena, such as jerks or vibrations during machine operation, which may result in the structure breaking and many unnecessary downtimes related to mechanical damage.

Keywords: induction motor, inverter, control algorithm, motor model, opencast mining machine

1. Wprowadzenie do systemów sterowania maszyn górnictwa odkrywkowego

Rozdział zawiera odniesienia do rzeczywistych charakterystyk ruchowych maszyn, ale bez szczegółowego podawania typu maszyny czy miejsca zainstalowania, gdyż poruszane zagadnienia dotyczą ciągle aktualnych problemów awaryjności elektromechanicznej w pracy maszyn górnictwa odkrywkowego. Aktualne struktury i obecny sposób funkcjonowania służb utrzymania ruchu kopalń oraz wymiana pokoleniowa, często są przyczyną dopuszczenia do ruchu zmodernizowanych maszyn odkrywkowych, które już od pierwszego uruchomienia poważnie niedomagają w zakresie regulacji napędów falownikowych prądu przemiennego. Podstawowy problem, który często zgłaszają służby utrzymania ruchu maszyn górnictwa odkrywkowego to fakt, iż maszyny, które zostały odebrane i pracują, nie oznaczają, że są właściwie sterowane, a co za tym idzie – bezpieczne. Potwierdzeniem tego są publikacje pracowników PGE [1, 2, 3, 4] oraz badania wykonane przez autorów rozdziału. O tym, że urządzenia elektromechaniczne zmieniają swoje parametry techniczne podczas pracy, wiemy z fizyki a potwierdzeniem są publikacje naukowo-techniczne [5, 6, 7]. Przykładowo, z uwagi na pracę maszyn górniczych, w terenie otwartym, na zewnątrz, w różnych warunkach atmosferycznych, rzeczywiste parametry rezystancji uzwojeń silników napędów jazdy, obrotu i podnoszenia, jako zależne od temperatury, zmieniają się. Odbiegają one również od parametrów modelowych, przyjętych jako skupione, a zidentyfikowanych podczas rozruchu (rys. 1).

Motor type: [1] Induction motor (rotating) Parallel motor connection Number: 1

Order no.: Motor code number: **Dane znamionowe silnika**

Dane znamionowe silnika

Par.	Parameter text	Value	Unit
p304[0]	Rated motor voltage	690	Vrms
p305[0]	Rated motor current	75.00	Arms
p307[0]	Rated motor power	75.00	kW
p308[0]	Rated motor power factor	0.890	
p310[0]	Rated motor frequency	50.00	Hz
p311[0]	Rated motor speed	985.0	rpm
p335[0]	Motor cooling type	[1] Forced cool	

Dane modelu zastępczego silnika

Par.	Parameter text	Value	Unit
p320[0]	Motor rated magnetizing current/short-circuit cur	24.266	Arms
p322[0]	Maximum motor speed	0.0	rpm
p341[0]	Motor moment of inertia	3.020510	kgm ²
p342[0]	Ratio between the total and motor moment of ine	1.224	
p344[0]	Motor weight (for the thermal motor model)	775.0	kg
p352[0]	Cable resistance	0.09200	ohm
p353[0]	Motor series inductance	0.045	mH
p1062[0]	Maximum speed	985.000	rpm

Dane modelu zastępczego silnika

Par.	Parameter text	Value	Unit
p350[0]	Motor stator resistance cold	0.03945	ohm
p354[0]	Motor rotor resistance cold / damping resistance	0.05526	ohm
p356[0]	Motor stator leakage inductance	1.87765	mH
p358[0]	Motor rotor leakage inductance / damping induct.	1.95285	mH
p360[0]	Motor magnetizing inductance/magn. inductance	48.76349	mH

Motor/control parameters: [0] No calculation

Wbudowane metody identyfikacji parametrów zastępczych silnika i nastaw regulacji

Edt

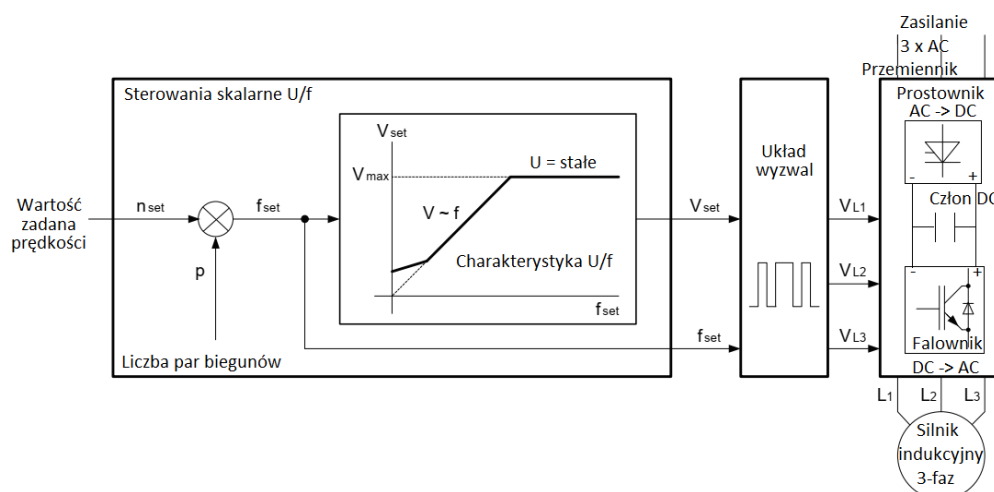
Rys. 1. Podstawowe parametry modelu silnika w algorytmie sterowania przemiennika Siemens Sinamics (Opracowanie na podstawie programu Starter firmy Siemens [8])

Informacje przedstawione na rysunku 1 pozwalają na sprawdzenie, jakimi parametrami został opisany podłączony silnik oraz jakie są aktualne nastawy regulacji w algorytmie sterowania. Za pomocą funkcjonalności wbudowanej przez producenta do oprogramowania przemiennika, można wykonać konieczne procedury identyfikacji parametrów modelowych silnika czy optymalizacji nastaw struktur regulacji PID. Niestety, nie wszystkie wbudowane procedury można wykonać bezpośrednio na obiekcie uruchamianej maszyny górniczej, np. z uwagi na konieczność współpracy

z podłączonym obciążeniem. Natomiast wszystkie wykonane testy wymagają weryfikacji ruchowej na obiekcie (jazda, obrót, podnoszenie) i stosownej walidacji. Należy pamiętać, że instrukcja producenta jasno określa procedurę uruchamiania, do którego wymagany jest wykwalifikowany personel. Dlatego też w instrukcji obsługi przemiennika znajdują się zapisy stwierdzające, że wiele nastaw dokonujemy na własną odpowiedzialność oraz pojawia się informacja, że „nieprawidłowe nastawy parametrów mogą być niebezpieczne” [8, 9]. Z uwagi na powyższe oraz wychodząc naprzeciw potrzebie wsparcia naukowego służb utrzymania ruchu, autorzy postanowili podzielić się własnymi doświadczeniami, aby wskazać kierunek i możliwości poprawy oraz całkowitej lub częściowej eliminacji tzw. zjawisk niekorzystnych. Celem tego działania jest poprawa bezpieczeństwa, redukcja zagrożeń oraz eliminacja drogich napraw i nieplanowanych przestoju maszyn. Problematyka dotycząca algorytmów sterowania maszyn była również szeroko omawiana w publikacjach [10, 11, 12, 13].

2. Dobór algorytmu sterowania do aplikacji

W zakresie napędów standardowych (silniki indukcyjne, regulacja prędkości), które są stosowane w górnictwie odkrywkowym, producenci przemienników zapewniają możliwość wyboru algorytmu skalarnego (sterowanie skalarnie, charakterystyka U/f , regulator prądu) – rysunek 2 lub polowozorientowanego (sterowanie wektorowe, model zastępczy silnika, regulator prędkości i prądu) – rysunek 3. Algorytmy te mogą korzystać z bezpośredniego pomiaru prędkości obrotowej wirnika silnika lub prędkość może być wyliczana pośrednio.

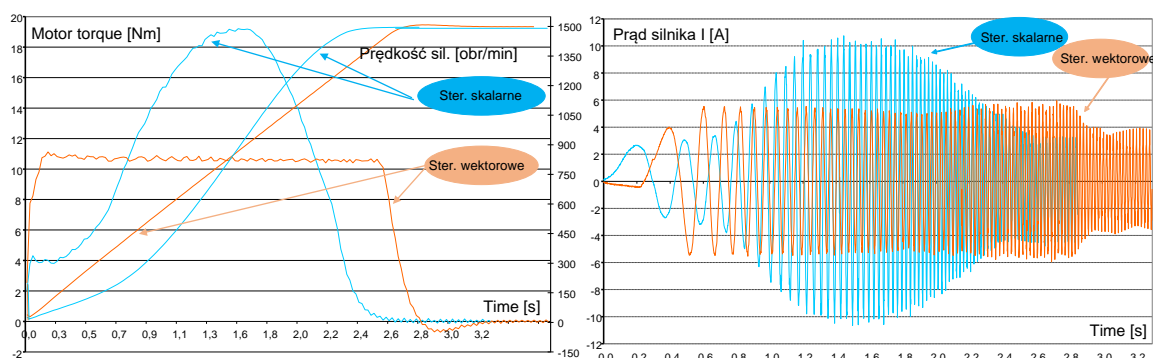


Rys. 2. Algorytm sterowania skalarnego silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika Sinamics (Opracowanie na podstawie dokumentacji Siemens [8])

W algorytmach skalarnych (rys. 2) napięcie zasilające silnika podawane jest w punktach częstotliwości określonych charakterystyką U/f (napięcie/częstotliwość). Głównym elementem sterującym jest regulator prądu stojana, a sterowanie nie weryfikuje tego, co dzieje się w obciążeniu. Istnieje możliwość zdefiniowania charakterystyki uwzględniającej częściowo oddziaływanie obciążenia (kompensacja poślizgu). Podczas konfiguracji przemiennika do pracy w tym algorytmie ważnym jest właściwy wybór kształtu charakterystyki jako liniowy lub paraboliczny (musi być dopasowany do charakterystyki obiektu, np. pompy, wentylatory). Kolejnym krokiem jest definicja napięcia, które ma się pojawiać przy zerowej częstotliwości. Wielkość ta przekłada się bezpośrednio na moment rozruchowy. Z uwagi na pracę regulatora prądu w stanach przejściowych, określamy również nastawę prądu maksymalnego.

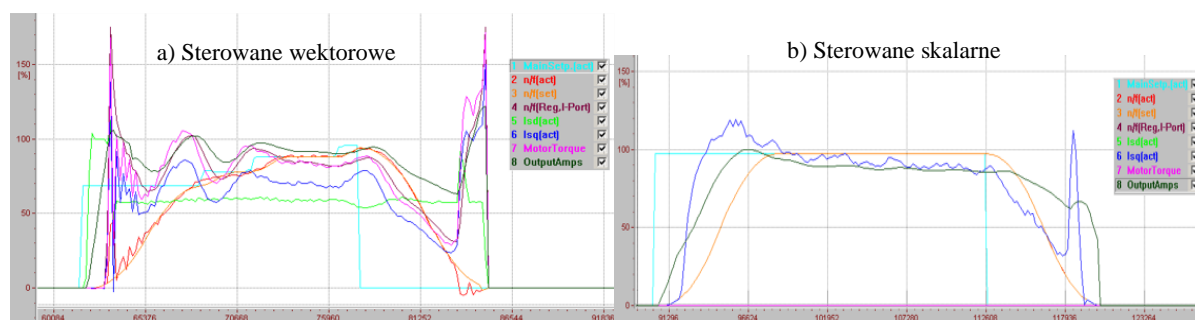
wnioskowaniu na temat problemów w aplikacji oraz informacji uzyskanych z trakcie okresu eksploatacji od służb utrzymania ruchu, należy przewidzieć, że błędy aplikacyjne mogą wprowadzać zagrożenia dotyczące uszkodzeń napędów elektromechanicznych, np. obrót, łącznie z możliwością wpływu na pęknięcie konstrukcji mechanicznych, czy napędów jazdy – pęknięcie gąsienic. Z tego powodu, właściwe rozpoznanie parametrów elektromechanicznych maszyny górniczej oraz ich przeniesienie, jako odwzorowanie do algorytmu jest tutaj sprawą kluczową.

Na rysunku 4 przedstawiono porównanie działania algorytmów przemienników dla sterowania skalarnego oraz wektorowego W obu przypadkach ważna jest odpowiednia parametryzacja. W sterowaniu skalarnym występują jednak duże przeregulowania wynikające z wybranej charakterystyki, która może być niedopasowana do obiektu regulacji.



Rys. 4. Porównanie przebiegów rozruchowych wektorowego oraz skalarnego sterowania silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika SIMOVERT MASTERDRIVES CUVC [9] (Opracowanie na podstawie [6, 7])

W sterowaniu wektorowym ważnym zagadnieniem jest zarówno odpowiednia parametryzacja, jak również właściwe odwzorowanie parametrów modelowych całej aplikacji w algorytmie przemiennika. Na podstawie porównania można zauważyć, że algorytm wektorowy znacznie dokładniej odtwarza dany proces działania silnika, a szczególnie stany dynamiczne. Należy również pamiętać, że w sytuacjach szczególnych (napędy grupowe) nie zawsze zastosowanie sterowania wektorowego będzie dobrym rozwiązaniem – rysunek 5.



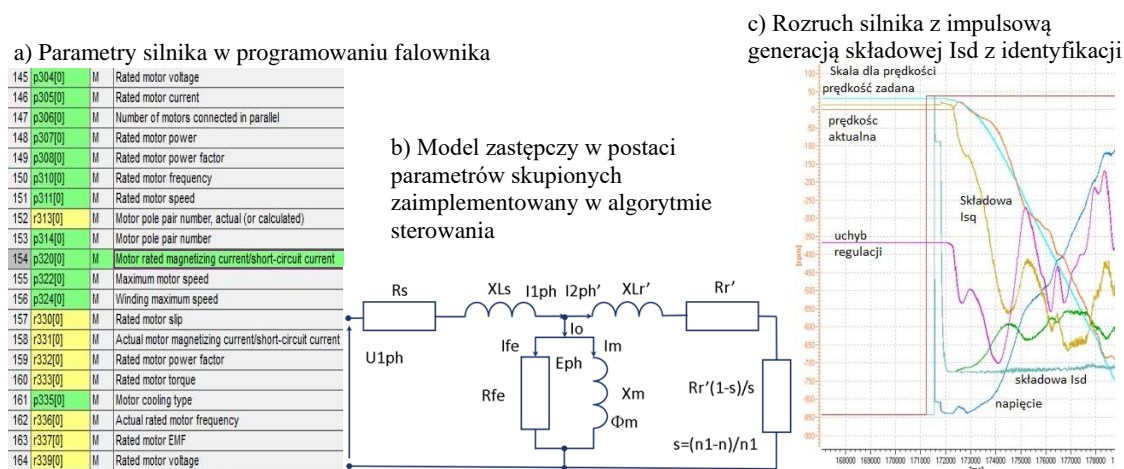
Rys. 5. Zmiana algorytmu sterowania wektorowego na skalarny w przęnośniku zdawczym obrotu nadwozia dla grupowego układu sterowania (Opracowanie na podstawie [11, 13, 15])

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi rozruchowe przęnośnika zdawczego dla napędu obrotu nadwozia w przypadku grupowego układu sterowania – jeden przęmiennik steruje grupą silników. Początkowo napęd obrotu przęnośnika zdawczego sterowany był wektorowo. Z uwagi na sposób działania algorytmu oraz brak dokładnego modelu zastępczego czterech silników, na rysunku 5a widoczne są silne przeregulowania i oscylacje w zakresie parametrów zbiorczych: prędkości, prądu i momentu silnika. W napędach o mocach kilkudziesięciu kW, prąd stojana jest mierzony w 3 fazach

przewodów wyjściowych do silników, ale w algorytmie grupowym prąd ten rozkłada się na wszystkie silniki. Natomiast prędkość jest mierzona enkoderem lub wyliczana matematycznie. Sam pomiar prędkości odbywa się tylko na jednym silniku (nie bierzemy pod uwagę układu Master – Slave), a chwilowe prędkości pozostałych silników znacząco mogą się różnić. Generowany moment również jest wypadkową ze wszystkich napędów. Na bazie zarejestrowanych przebiegów (rys. 5a) widać, że działanie maszyny zostaje zakłócone, pojawiają się silne oscylacje w przebiegach. Powoduje to utratę możliwości sterowania maszyną – brak reakcji na zmiany wartości zadanej. Przyczyną tej sytuacji jest błędnie wybrany i zaprogramowany algorytm sterowania. Pojawia się konieczność weryfikacji oraz wprowadzenia zmian. Zaimplementowanie algorytmu sterowania skalarnego do napędu obrotu realizowanym w układzie grupowym czterech silników indukcyjnych zasilanych z przemiennika znacząco poprawia parametry regulacji i nie ma sytuacji, kiedy tracimy kontrolę. Przebiegi prądów, momentów i prędkości posiadają technologiczny charakter zmian, bez oscylacji i przeregulowań, a wprowadzone zmiany umożliwiają w pełni kontrolowaną pracę maszyny (rys. 5b).

3. Wpływ parametrów schematu zastępczego modelu silnika na pracę algorytmu

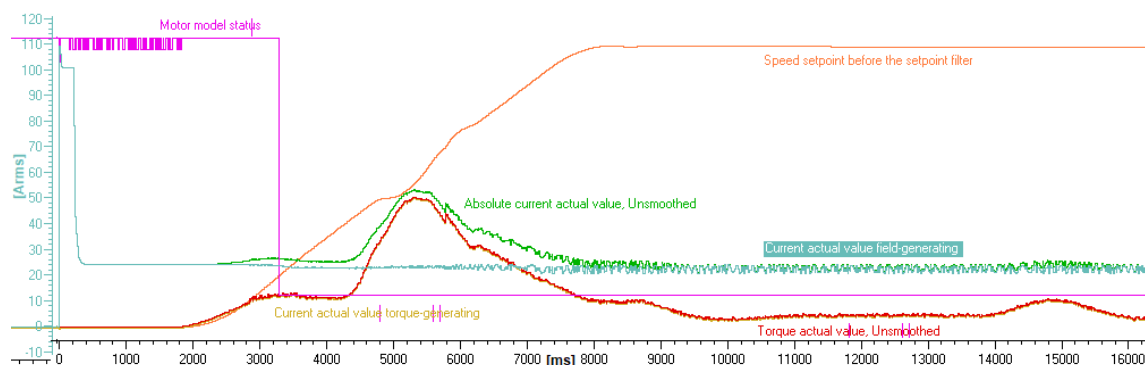
Na rysunku 6 przedstawiono fragment listy parametrów, model zastępczy oraz przebieg startu przemiennika Sinamics, który jest urządzeniem często stosowanym w aplikacjach maszyn górnictwa odkrywkowego. Na rysunku 6a mamy fragment listy parametrów, który podobnie jak rysunku 1, wyraźnie przedstawia zbiór zaawansowanych parametrów opisujących model silnika, wymaganych do poprawnego działania. Na rysunku 6b mamy klasyczny model zastępczy typu T silnika w postaci parametrów skupionych, który po pewnych uproszczeniach jest zaimplementowanych w strukturze parametrów przemiennika, co również zaprezentowano i omówiono na rysunku 3.



Rys. 6. Parametry zastępcze silnika w oprogramowaniu narzędziowym falownika SINAMICS S firmy Siemens wraz ze schematem zastępczym typu T silnika oraz rozruchem (Opracowanie na podstawie [13, 15])

gdzie: R_s – rezystancja uzwojenia stojana, R_r' – rezystancja uzwojenia wirnika sprowadzona na stronę uzwojenia stojana, X_{Ls} – reaktancja rozproszenia (indukcyjność) uzwojenia stojana, X_{Lr}' – reaktancja rozproszenia (indukcyjność) uzwojenia wirnika sprowadzona na stronę uzwojenia stojana, X_m – reaktancja wzajemna magnesująca (indukcyjność główna), s – poślizg, I_{1ph} – prąd fazowy stojana, I_{2ph}' – sprowadzony prąd fazowy wirnika, I_m – prąd magnesujący, n_1 – prędkość synchroniczna, E_{ph} – indukowana siła elektromotoryczna, U_{1ph} – napięcie fazowe stojana, n – prędkość obrotowa wirnika silnika

Na rysunku 6c mamy fragment charakterystyki rozruchowej, gdzie wyraźnie widać przebieg składowej I_{sd} prądu stojana, odpowiadającej za wzbudzenie, która nie została określona poprawnie w wybranym algorytmie sterowania.

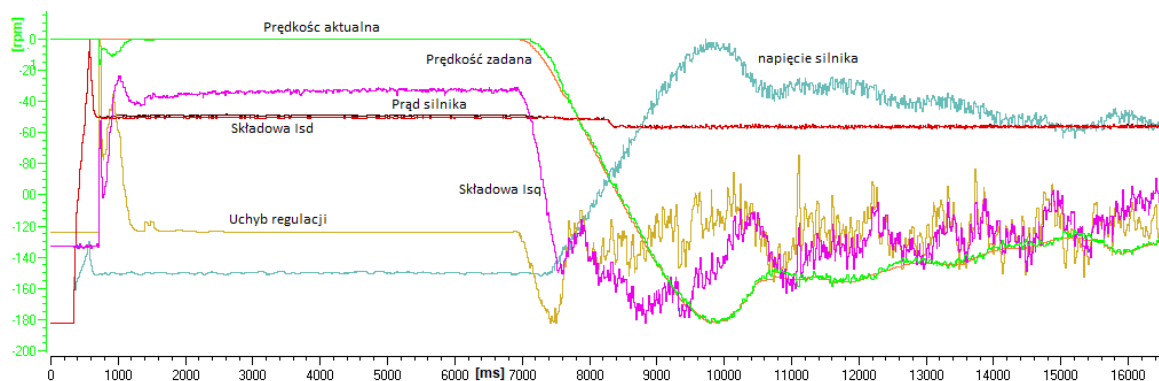


Rys. 7. Przebieg rozruchu silnika z błędnie określoną wartością prądu magnesującego (poziom prądu znamionowego) (Opracowanie na podstawie [16])

Na podstawie wykonanych badań – rysunek 6c i rysunek 7, można stwierdzić, że częstszym problemem występującym podczas pracy algorytmu jest niewłaściwy dobór prądu magnesującego I_m (składowa I_{sd} prądu stojana), który objawia się wpływem na wydłużenie elektromagnetycznych procesów przejściowych i generuje opóźnienia w procesie rozruchu. Na rysunku 7, od chwili podania komendy start, opóźnienie trwa około 2 sekund. Dodatkowo, w źle dostrojonym układzie, po zmianie modeli zastępczych – rysunek 6c, mogą pojawiać się oscylacje, będące źródłem drgań, a w przyszłości dodatkowym źródłem uszkodzeń konstrukcji mechanicznych [13, 15]. Parametry zastępcze mają znaczący wpływ na dopasowanie modelu do obiektu, a co za tym idzie odwzorowanie charakterystyk ruchowych w trakcie pracy napędu. Silnik indukcyjny jest obiektem nieliniowym i istnieje zasadnicza trudność w odwzorowaniu klasycznym (skupionym) odwzorowania go w algorytmie. Współczesne systemy cyfrowe dobrze sobie z tym radzą, pod warunkiem zbudowania odpowiedniej bazy danych i jej aktualizację, na przykład poprzez czasową weryfikację przebiegów ruchowych napędów maszyn. Dla zainteresowanych, najważniejsze podstawy literatury naukowej wraz z niezbędnym aparatem matematycznym potrzebnym do dalszego zgłębiania podanych metod zebrano w niniejszym rozdziale w pozycjach literaturowych [17, 18, 19, 20].

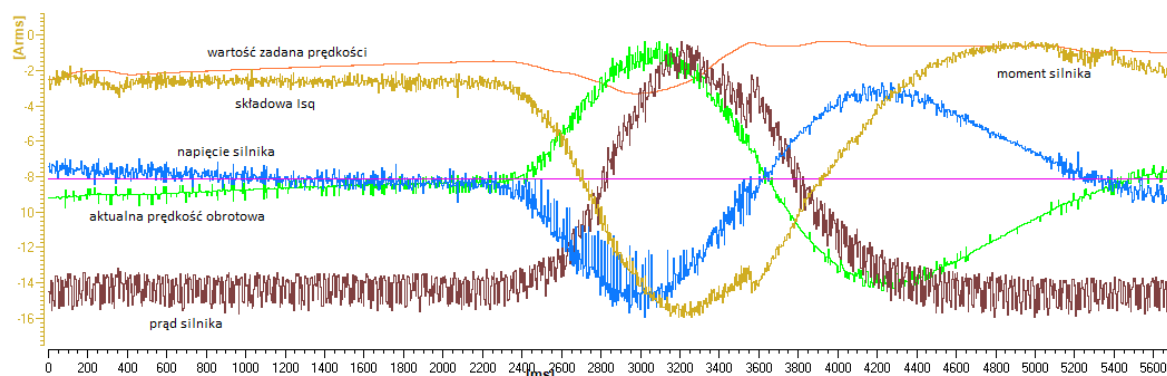
4. Wpływ nastaw regulatorów prędkości i prądu na pracę algorytmu

Na rysunku 8 przedstawiono przykład charakterystyk ruchowych napędów bębna dla stanu, gdy zachodzi potrzeba odwijania/nawijania. Zauważamy zmianę charakteru pracy napędu, uchyb regulacji jest na poziomie kilkunastu obrotów/minutę dla wartości odniesienia około 200 obrotów/minutę. W tym konkretnym przypadku należy zarówno zweryfikować nastawy regulacji, jak również parametry pracy algorytmu z uwagi na uchyb regulacji na poziomie większym od 5%.



Rys. 8. Porównanie charakterystyk ruchowych napędów jazdy silników sterowanych wektorowo dla parametrów otrzymanych z identyfikacji modelu zastępczego silnika (Opracowanie na podstawie [16])

W porównaniu do rysunku 6c oraz rysunku 8, widać zupełnie innych kształt krzywej generacji składowej I_{sd} prądu stojana, co pozwala stwierdzić, że wartość tego parametru została właściwie określona.



Rys. 9. Porównanie charakterystyk ruchowych napędów obrotu (Opracowanie na podstawie [16])

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi ruchowe napędu obrotu maszyny górniczej, gdzie w czasie około 2400 ms następuje zmiana wartości zadanej, trwająca do około 3600 ms, co daje nam czas 1,2 s. W tym czasie zmiany w procesie regulacji trwają ponad 5600 ms – aktualna prędkość obrotowa. Na tym przykładzie możemy przeanalizować sposób i reakcję układu na zmiany oraz ocenić szybkość działania algorytmu i nastaw regulacji. Na bazie powyższych działań można stwierdzić, że istnieje możliwość poprawy jakości regulacji algorytmów sterowania w działających maszynach. Oczywiście działania te wymagają weryfikacji obliczeniowej, symulacyjnej oraz organizacji prac weryfikujących na obiektach górniczych.

5. Metody poprawy

Na podstawie przeprowadzonych badań i zgromadzonych doświadczeń autorzy przedkładają następujące metody poprawy dopasowania algorytmów sterowania do obiektu regulacji maszyn górnictwa odkrywkowego, sterowanych silnikami indukcyjnymi, zasilanymi z przemienników częstotliwości:

- przeprowadzenie inwentaryzacji maszyn górnictwa odkrywkowego w zakresie jakości regulacji/sterowania (deklaracja pomocy ze strony Katedry Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej),
- wykonanie analizy awarii i uszkodzeń elektromechanicznych, pojawiających się na obiektach wraz lokalizacją przyczyn powstania i weryfikacją czasu działania, np. po wymianie komponentów mechanicznych na nowe lub regenerowane z odniesieniem do innych maszyn tego typu,
- wykonanie rejestracji ruchowych charakterystyk z maszyn sterowanych cyfrowo i weryfikację otrzymanych danych,
- dokonanie weryfikacji określenia wartości prądu magnesującego, parametrów schematu zastępczego, nastaw regulatorów prędkości i prądu oraz ograniczeń nastaw statycznych i dynamicznych; dla maszyn problematycznych, niezbędne będzie obliczenie parametrów zastępczych silników w różnych temperaturach i na tej podstawie implementacja funkcji dopasowujących obiekt do zmian, jak adaptacja zmian rezystancji zastępczej uzwojenia wirnika, która zależna jest od zmian temperatury,
- przeprowadzenie weryfikacji charakterystyk zarejestrowanych w dziedzinie częstotliwości; w rozdziale prezentujemy charakterystyki czasowe, ale dla nastaw dynamicznych i ich weryfikacji

konieczna jest analiza częstotliwościowa,

- nawiązanie współpracy z ośrodkami naukowymi, w ramach współpracy nauki z przemysłem, opracowanie środków zaradczych i prewencyjnych oraz wdrożenie zmian,
- weryfikację opóźnień powstających w pętlach regulacji np. sprzężenia zwrotnego, które mogą powodować chwilowe utraty stabilności układów sterowania maszyn górniczych.

Zdaniem autorów, powinno się zmienić od lat funkcjonujące podejście do sposobu przygotowania i realizacji projektów w zakresie budowy nowych maszyn oraz modernizacji istniejących maszyn bazujących na napędach falownikowych z silnikami indukcyjnymi. Odwzorowanie najważniejszych parametrów zastępczych w zaawansowanym algorytmie sterowania dla obiektu sterowanego, jakim jest maszyna typu zwałowarka, jest zadaniem bardzo złożonym. Informacje opisujące parametry elektromechaniczne mają zasadniczy wpływ na stabilność układu regulacji.

6. Podsumowanie

Nowoczesne rozwiązania w dziedzinie innowacyjnych maszyn górnictwa odkrywkowego oraz systemy techniki cyfrowej, poprawiają wydajność i bezpieczeństwo oraz ułatwiają monitorowanie procesu sterowania maszyną górną i systemem wydobywania. Jednak, ich nieprawidłowe zastosowanie może niestety powodować zagrożenia i znaczące szkody materialne w eksploatacji. Dobór rozwiązań dla nowych lub modernizowanych maszyn, nigdy nie powinien być dziełem tylko jednego autora. Projekty z zakresu automatyki i napędu maszyn, podobnie jak same maszyny, są interdyscyplinarne i powinny być wieloetapowo weryfikowane na różnych szczeblach realizacji. Dodatkowo, wspomaganie projektowania oprogramowaniem typu CAD, czy oprogramowaniem do modelowania i symulacji, pozwala na weryfikację dobranych parametrów. Narzędzia koncepcji Przemysł 4.0 pozwalają również wykonywać interaktywne symulacje działania obiektów oraz dokonywać szacunkowej oceny tego, co mogłoby się zdarzyć na obiekcie, będąc skutecznym narzędziem w nowoczesnej pracy projektowej. Kluczową kwestią w implementacji techniki cyfrowej jest znajomość parametrów zastępczych sterowanego obiektu (silnik, napęd, maszyna) lub właściwe opracowanie zbioru parametrów zastępczych, które odwzorują obiekt regulacji w wybranym algorytmie sterowania. Bardzo ważne są przyjęte ograniczenia i wykonane obliczenia wartości granicznych zarówno dla stanów statycznych, a zwłaszcza dla stanów dynamicznych. Dane uzyskane z wykonanych obliczeń powinny być podstawą doboru i uruchomienia falownikowego systemu sterowania. Umożliwi to dokładne zaimplementowanie obiektu regulacji w algorytmie sterowania oraz wprowadzenie nastaw wraz z odwzorowaniem parametrów przyłączonych silników, sprzęgieł, przekładni mechanicznych, czy parametrów konstrukcji (częstotliwość rezonansowa).

Finalnym dokumentem, który powinien być wymagany jest szczegółowy raport z zarejestrowanymi przebiegami z uruchomienia. W dokumencie tym powinny być podane wszystkie parametry funkcyjne, tj.: parametry zastępcze, parametry zmierzone lub zidentyfikowane, metody i przyjęte kryteria doboru nastaw regulacji oraz wyboru danego algorytmu sterowania. Bazowanie wyłącznie na procedurach tzw. auto-tuningu i brak rozpoznania pod względem parametrów zastępczych, ograniczeń i technik regulacyjnych maszyny, stanowią realne zagrożenie dla obsługi i dalszej eksploatacji.

Literatura

1. Hertel L.: Technika przekształtnikowa w napędach jazdy i obrotu na maszynach podstawowych – doświadczenia eksploatacyjne, str. 38, Górnictwo Odkrywkowe 1, 2008

2. Hertel L., Nowacki H.: Algorytmy sterowania napędami na modernizowanych koparkach. *Górnictwo Odkrywkowe*, str. 39. PGE SA, Oddział KWB Bełchatów w Rogowie
3. Błaszczyk Ł., Jabłoński M.: Konfiguracja, diagnostyka i wymiana danych procesowych w teleinformatycznych sieciach przemysłowych. *Technika zagraniczna maszyny, technologie, Mat. Sigma-Not*
4. Uchroński Ł., Jabłoński M.: Wymiana danych procesowych w aplikacjach przemysłowych. *Technika zagraniczna maszyny, technologie, materiały Sigma-Not*
5. Jabłoński M.: Analiza parametrów funkcyjnych oraz modyfikacja algorytmów sterowania połowozorientowanego napędu falownikowego z silnikiem indukcyjnym. Praca doktorska, PŁ 2006
6. Jabłoński M., Anuszczyk J.: Współczesne algorytmy sterowania maszyn górnictwa odkrywkowego w przykładach aplikacyjnych. VII Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego 2011 „Węgiel Brunatny - Energia - Rozwój”
7. Anuszczyk J., Jabłoński M. Układy falownikowe w napędach jazdy maszyn górnictwa odkrywkowego. V Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego 2007 „Węgiel Brunatny - Energia - Rozwój”
8. Dokumentacja SIEMENS dla SINAMICS S120 / S150, G120/G150
9. Dokumentacja SIEMENS dla SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control v.3.2. CUVC
10. Jabłoński M.: II Konferencja Naukowo-Techniczna Elgor 2007. Napędy urządzeń górnictwa odkrywkowego: Optymalizacja struktur sterowania nowoczesnych napędów elektrycznych na przykładzie Sinamics S120
11. Jabłoński M.: Ekspertyza przenośnika samojezdnego PGOT-4500. Protokół z wykonanych prac zlecenie HP/AG-W26/09. PGE KWB Turów S.A.
12. Jabłoński M.: X Konferencja Naukowo-Techniczna Innowacyjne Maszyny i Technologie – Efektywność 2014: Rozwój innowacyjnych technik systemów sterowania napędowych monitorowania bezpieczeństwa i użytkowania maszyn a trendy rozwojowe maszyn górnictwa odkrywkowego w Polsce
13. 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
14. Blaschke F.: Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronenmaschine. *Siemens Forschungs-und Entwicklungsberichte*, Vol. 1, pp. 184-193, 1972
15. Jabłoński M., Borkowski P.: Industrial implementations of control algorithms for voltage inverters supplying induction motors. *Archives of Electrical Engineering*, 2021, vol. 70(2), pp. 475–491
16. Jabłoński M.: Opracowanie naukowo-techniczne badań algorytmów sterowania maszyn górnictwa odkrywkowego. Katedra aparatów elektrycznych. Politechnika Łódzka. 2021
17. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Helion, Gliwice 1998
18. Tunia H., Kaźmierkowski M.: *Automatyka napędu przekształtnikowego* PWN, Warszawa 1987
19. Kalus M., Skoczkowski T.: *Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego*. Gliwice 2003
20. Vas P.: *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford University Press 1998