



Wymiana systemów sterowania wraz z implementacją cyfrowej falownikowej techniki napędowej w maszynach górnictwa odkrywkowego

Mariusz Jabłoński - Politechnika Łódzka

Piotr Borkowski - Politechnika Łódzka

Streszczenie: Rozdział omawia najważniejsze kwestie dotyczące implementacji rozwiązań w zakresie cyfrowych algorytmów sterowania techniką napędową w maszynach górnictwa odkrywkowego. Na bazie zebranych doświadczeń, poruszone zostaną kwestie związane z problemami, jakie pojawiają się przy wymianie rozwiązań techniki analogowej na technikę cyfrową bez stosownej wiedzy oraz weryfikacji modelowej i obliczeniowej do nowo zastosowanych technologii. Rozdział prezentuje rzeczywiste sytuacje, kiedy nastawy, a szczególnie dobór nastaw napędów, sposób oraz szybkość sterowania w aplikacji nie został zweryfikowany obliczeniowo żadną z dowolnych metod inżynierskich lub symulacyjnych. Omówione zagadnienia dotyczą problemów uruchamiania modernizowanych maszyn odkrywkowych w zakresie napędów prądu przemiennego z przemiennikami częstotliwości i falownikami napięcia, zbudowanymi w oparciu o tranzystory IGBT sterujące silnikami indukcyjnymi. Systemy te wykorzystują różne algorytmy sterowania silnikami (skalarne i wektorowe) i mogą pracować indywidualnie (falownik steruje pracą silnika np. napędami jazdy) lub grupowymi (falownik steruje kilkoma silnikami np. napęd obrotu). Z kolei algorytmy sterowania implementują cyfrowe struktury układów sterowania z regulatorami PID, których dobór nastaw jest jednym z najważniejszych zagadnień w działaniu całej maszyny. Ich nieprawidłowe ustawienia mogą skutkować drganiami podczas pracy maszyny, co może prowadzić do zagrożeń i uszkodzeń. Z uwagi na pracę maszyn górniczych w terenie otwartym, w różnych warunkach atmosferycznych, rzeczywiste parametry silników odbiegają od skoncentrowanych parametrów zidentyfikowanych podczas rozruchu. Następnie pojawiają się problemy z odwzorowaniem modelu silnika w algorytmie sterowania. Ponadto maszyny i ich konstrukcje pracują w zmiennych stanach dynamicznych, podczas elektromagnetycznych procesów ruchowych i stanów nieustalonych, które wynikają ze zmieniającego się cyklu pracy związanego m.in. z podłożem i sposobem pracy narzuconym przez operatora. Przyczyny te niekorzystnie wpływają na działanie, stabilność, zachowanie i dynamikę układu maszyny, który często generuje drgania podczas pracy maszyny i może skutkować pękaniem konstrukcji oraz wieloma niepotrzebnymi przestojami związanymi z awariami lub uszkodzeniami mechanicznymi.

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

Replacement of control systems due to the implementation of digital inverter drive technology in opencast mining machines

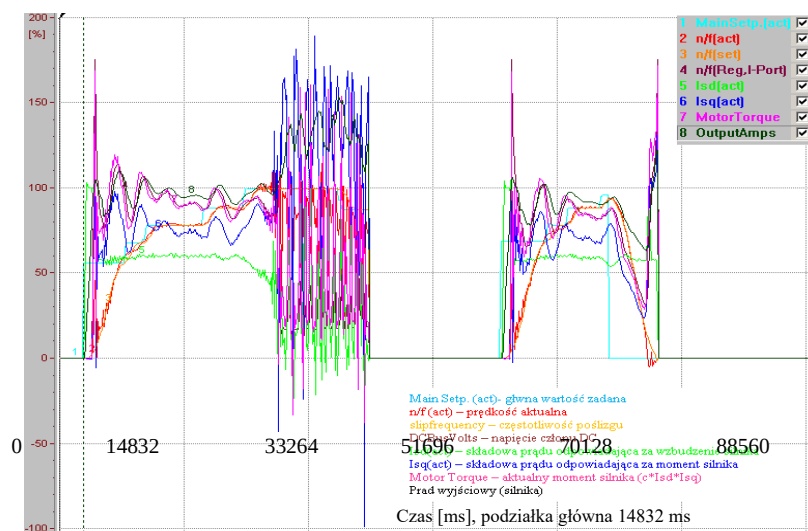
Abstract: The chapter discusses the most important issues related to the implementation of solutions in the field of digital algorithms for controlling drive technology in opencast mining machines. On the basis of the practical experiences, issues related to the problems happened when replacing the solutions of analog technology with digital technology without appropriate knowledge, modeling, simulation and computational verification for newly applied technologies will be discussed. The chapter presents real situations when the settings, especially the selection of drive settings, the method and speed of control in the application, have not been computationally verified by any of the engineering or simulation methods. The discussed issues concern the problems of starting modernized opencast machines in the field of AC drives with frequency converters and voltage inverters, built on the basis of IGBT transistors controlling induction motors. These systems use various motor control algorithms (scalar and vector) and can work individually (the inverter controls the operation of the motor, e.g. main drives) or in groups (the inverter controls several motors, e.g. a rotation drive). In turn, the control algorithms implement digital structures of control systems with PID controllers, the selection of which is one of the most important issues in the operation of the entire machine. Incorrect settings could have results in vibrations during machine operation, which can lead to hazards and damages. Due to the operation of mining machines in the open area, in various weather conditions, the actual parameters of the induction motors are different from the equivalent model parameters identified during start-up. From this reason there are many problems with properly mapping the motor model parameters in the selected control algorithm. In addition, machines and their constructions work in variable dynamic states, during electromagnetic motion processes and transients, which result from the changing work cycle related to the ground and the working method imposed by the operator. These causes have adversely affect for the operation, stability, behavior and dynamic states of the machine system, which often generates vibrations

during machine operation and can result cracking of the structure and many unnecessary downtimes related to breakdowns or mechanical damages.

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

1. Wprowadzenie do systemów sterowania maszyn górnictwa odkrywkowego

Obecne standardy automatyki stosowane w maszynach górnictwa odkrywkowego, to klasyczne sterowniki PLC, realizujące sterowanie napędem poprzez sieci komunikacyjne wraz ze zintegrowanym bezpieczeństwem do sterowania maszyn. Współczesna technika napędowa stosowana w górnictwie odkrywkowym, to głównie napędy prądu przemiennego z przemiennikami oraz falownikami napięciowymi budowanymi w oparciu o układy z tranzystorami IGBT sterujące silnikami indukcyjnymi, często opisywanymi parametrami profilowanymi w celu aplikacji napędów elektrycznych. Systemy te wykorzystują różne algorytmy sterowania silnikami (skalarne i wektorowe) oraz mogą pracować indywidualnie (falownik steruje pracą silnika, np. napędy jazdy) lub grupowo (falownik steruje kilkoma silnikami np. napędy obrotu). Z kolei, w algorytmach sterowania implementuje się cyfrowe struktury układów regulacji z regulatorami PID, których dobór jest jednym z najistotniejszych kwestii w pracy całej maszyny. Ich niepoprawne nastawy mogą skutkować drganiami w pracy maszyny, co może doprowadzać do zagrożeń i uszkodzeń (rys. 1).

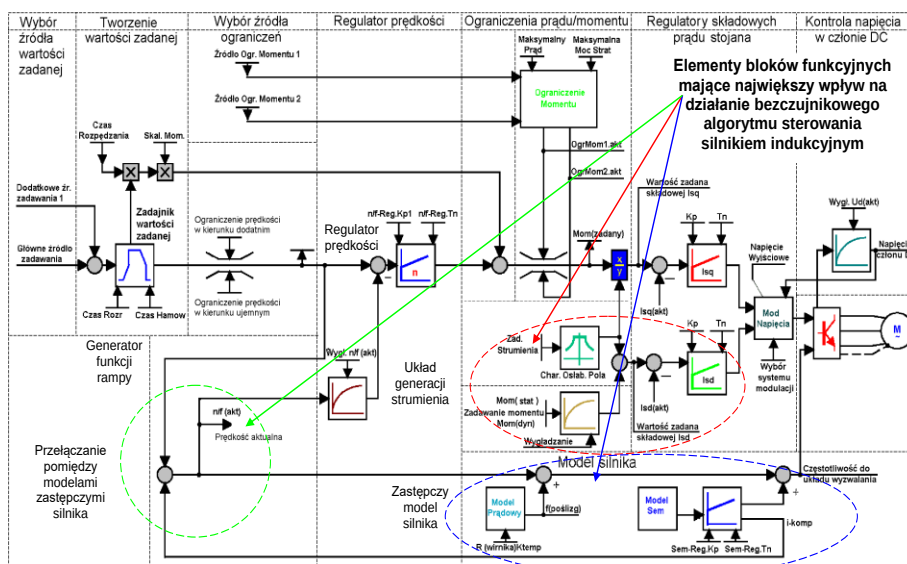


Rys. 1. Badania przenośnika samojezdnego PGOT - praca przenośnika odbierającego – jazda w kierunku od skarpy do koparki, warunki atmosferyczne: zima, mróz temperatura -18°C., [opracowanie własne na podstawie [1]]

Z uwagi na pracę maszyn górniczych w terenie otwartym, w różnych warunkach pogodowych, rzeczywiste parametry silników będą odbiegały od parametrów zidentyfikowanych podczas ich uruchomienia i pojawi się problem z odwzorowaniem modelu silnika w algorytmie regulacji [2]. Dodatkowo maszyny i ich konstrukcje pracują w stanach dynamicznych, podczas procesów ruchowych, które wynikają ze zmieniającego się cyklu pracy, zmian podłoża czy trybu pracy narzuconego przez operatora. Wymienione powyżej powody mogą wpływać niekorzystnie na pracę, stabilność, zachowanie się i dynamikę układu, co może objawiać się drganiami w trakcie pracy maszyny i skutkować wieloma niepotrzebnymi awariami oraz uszkodzeniami mechanicznymi konstrukcji - rysunek 1 [3, 4]. W kolejnych punktach omówione zostaną kwestie dotyczące zagadnień newralgicznych oraz zjawiska niekorzystne, zarejestrowane w trakcie badań, rozruchów i rutynowych uruchomień wraz z komentarzami i zaleceniami w odniesieniu do wniosków eksploatacyjnych opublikowanych przez specjalistów z dziedziny napędów górnictwa odkrywkowego w literaturze branżowej [5, 6].

2. Badania algorytmów sterowania napędami maszyn górniczych

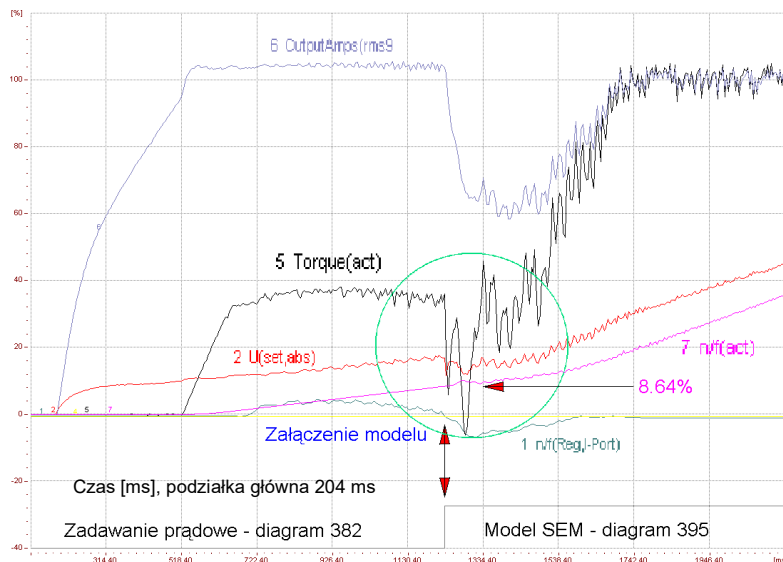
W maszynach górnictwa odkrywkowego, napędy z silnikami indukcyjnymi o regulowanej prędkości obrotowej, często współpracują z przemiennikami sterowanymi wektorowo w układzie z prędkościowym sprzężeniem zwrotnym lub bez sprzężenia. Z uwagi na specyfikę i reżim pracy (uszkodzenia enkoderów mierzących prędkość obrotową silników), jako bazowy należy przyjąć model algorytmu sterowania wektorowego w układzie bez sprzężenia zwrotnego. Prędkość wirnika silnika nie jest w takim przypadku mierzona a wyłącznie wyliczana (estymowana) na bazie pomiaru prądów fazowych stojana oraz wyznaczenia kąta obciążenia. Silnik wówczas pracuje w układzie bez czujnikowym (brak czujnika prędkości) – rysunek 2. W takim układzie, z uwagi na zasadę działania algorytmu, będą występowały problemy z pracą napędu w zakresie niskich prędkości obrotowych, co w przypadku maszyn górniczych jest znaczącym utrudnieniem. Z uwagi na specyfikę budowy maszyny (szafy sterownicze, napędy, silniki są instalowane na jednej wspólnej platformie), fabryczne procedury auto-strojenia nastaw często nie mogą mieć zastosowania, a z uwagi na zmiany temperatury, pojawia się również problem poprawnego odwzorowania zastępczego modelu silnika w wybranym algorytmie sterowania – np. układy jezdne, dźwignice, maszyny ze sprzęgiem mechanicznym, napędy obrotu.



Rys. 2. Wektorowa regulacja prędkości (częstotliwości) w układzie bez czujnikowym (brak czujnika prędkości) – realizacja praktyczna w postaci diagramu funkcyjnego przmiennika SIMOVERT VC firmy Siemens [opracowanie własne na podstawie [7]]

Na rysunku 2 wyraźnie zaznaczono elementy bloków funkcyjnych, które w stanach dynamicznych procesów przejściowych (rozruchy, zmiana obciążenia) odgrywają wiodącą rolę w pracy bez czujnikowego algorytmu wektorowego sterowania falownikiem w napędzie komercyjnym stosowanym w górnictwie odkrywkowym. Elementami tymi są: regulator prędkości, człon generacji strumienia silnika, człon generacji składowych prądu stojana I_{sd} silnika: I_{sd} – odpowiada za „wzbudzenie” i ustalenie pola elektromagnetycznego w maszynie oraz I_{sq} – odpowiada za moment silnika, zastępcze modele silnika indukcyjnego zaimplementowane w algorytmie sterowania (przełączane histerezo - model siły elektromotorycznej oraz model prądowy), układ do szybkiej generacji momentu oraz generator funkcji rampy (RFG). Elementy posiadają strukturę bloków funkcyjnych z parametrami nastawczymi, które razem tworzą algorytm sterowania (działania) napędu. Dotyczą one regulacji i są ściśle związane z elektromagnetycznymi procesami przejściowymi, jakie zachodzą każdorazowo w napędzie silnik - falownik w trakcie uruchamiania maszyny. Weryfikacji nastaw można dokonać np. za pomocą korekty nastaw parametrów prowadzących do zmniejszenia czasu generacji składowej biernej I_{sd} prądu stojana.

Dodatkowo, przy wykorzystywaniu algorytmów wektorowych, w sytuacjach, gdy zależy nam na minimalizacji czasu opóźnienia podczas rozruchu, w sterowaniu należy wykorzystywać niezależnie obie składowe prądu stojana I_{sd} oraz I_{sq} . Na podstawie pomiarów wykonanych w laboratorium oraz w trakcie rozruchu dźwignicy sterowanej z falownika z silnikiem indukcyjnym, można zauważyć, że proces ustalania się stanu elektromagnetycznego silnika o mocy $P_N = 1,5 \text{ kW}$ trwa około $\Delta t_w = 0,1 \text{ s}$. Natomiast silnika dźwignicy o mocy $P_N = 37 \text{ kW}$ ten czas wyniesie około $\Delta t_w = 0,9 \text{ s}$. Jest to czas Δt_w liczony od chwili podania sygnału „start” do chwili pojawienia się prędkości wału $n > 0$ (rys. 3).



Rys. 3. Rozruch silnika Sg90L4 w układzie bez czujnikowego algorytmu sterowania częstotliwością z uwzględnieniem zakresu układu zadawania prądu i model SEM [opracowanie własne na podstawie [2]]

W pierwszej chwili rozruchu, po podaniu sygnału „start”, pojawia się jedynie składowa bierna I_{sd} prądu stojana. Składowa czynna I_{sq} prądu stojana pojawia się w chwili, gdy wartość składowej I_{sd} zaczyna się ustalać na poziomie wynikającym z wartości prądu magnesującego (nastawa automatyczna lub wprowadzona w trakcie parametryzacji). W pierwszych chwilach, na zaciski silnika jest podawane bardzo małe napięcie, które wywołanym przepływem prądu wzbudza odpowiedni strumień. Dopiero w chwili, gdy strumień jest już ustalony następuje generacja momentu, który jest iloczynem wektorowym obu składowych. Regulacja momentu odbywa się przez zmianę składowej I_{sq} prądu stojana, do której mamy bezpośredni dostęp. Przebieg wypadkowego prądu stojana jest związany z przebiegami obu składowych, a jego wartość skuteczna wynosi: $I_s = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2}$. Prąd I_s jest porównywany ze stałą wartością parametru określającego prąd maksymalny silnika (nastawa parametru w falowniku) i musi spełniać warunek: $I_s \leq I_{smax}$ (nastawa parametru w falowniku). W efekcie, gdy prąd stojana jest mniejszy od dopuszczalnego, to różnica: $I_{smax} - I_s > 0$ i użyty element ogranicznika nie przepuszcza sygnału, a układ ograniczenia prądowego nie reaguje. Przedstawiony sposób opisu zamienia silnik indukcyjny w maszynę bardzo podobną do silnika prądu stałego, w którym prąd I_{mr} (wirnika) odpowiada za generację strumienia głównego silnika DC a składowa prądu stojana I_{sq} reprezentuje prąd twornika [8]. W takim przypadku schemat blokowy maszyny asynchronicznej zasilanej przez przemiennik z regulacją prądu stojana, buduje się na podstawie układu równań wektorowych zapisanych w układzie współrzędnych d i q wirujących

z prędkością synchroniczną ω_s współbieżnie z wektorem strumienia Ψ_r . Ponieważ zwykle obliczenia są prowadzone na podstawie fazowych wielkości elektrycznych i parametrów schematu zastępczego silnika, to w przypadku maszyny trójfazowej otrzymuje się następujący wzór na moment elektromagnetyczny [9]:

$$M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} [\operatorname{Re}(j \Psi_s I_s^*)] \quad (1)$$

gdzie:

- Ψ_s, I_s – wektory strumienia skojarzonego i prądu sprzężonego stojana (fazowe),
- M_e – moment elektromagnetyczny,
- p – liczba par biegunów,
- L_m – indukcyjność główna,
- L_r – indukcyjność wirnika.

W warunkach ustalonych (rys. 3) składowa prądu stojana I_{sd} jest stała. Również prąd magnesujący I_{mr} reprezentujący strumień wirnika i składowa prądu stojana I_{sq} , które stanowią o momencie silnika mają wartości stałe. Związek pomiędzy składowymi prądu stojana I_{sd} oraz I_{mr} jest następujący [10]:

$$I_{sd} = I_{mr} + T_r \frac{d I_{mr}}{d t} \quad (2)$$

gdzie:

T_r - stała czasowa obwodu wirnika $T_r = \frac{L_r}{R_r}$.

Wówczas zależność pomiędzy wielkościami wyjściowymi przemiennika: amplitudą prądu I_s oraz częstotliwością napięcia stojana f_s a polowo-zorientowanymi składowymi prądu stojana I_{sd} i I_{sq} , nie ma bezpośredniego zapisu matematycznego. Natomiast częstotliwość poślizgu wirnika f_r , jako wielkość nastawcza, nie występuje w bezpośrednim zapisie matematycznym w odniesieniu do tego przypadku. Pulsacja poślizgu silnika ω_r może być natomiast obliczona przy uwzględnieniu składowych d i q prądu stojana według następującego równania [10]:

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

gdzie:

- ω_r – pulsacja poślizgu silnika,
- L_m – indukcyjność magnesująca,
- L_r – indukcyjność rozproszenia,
- T_r – stała czasowa obwodu wirnika.

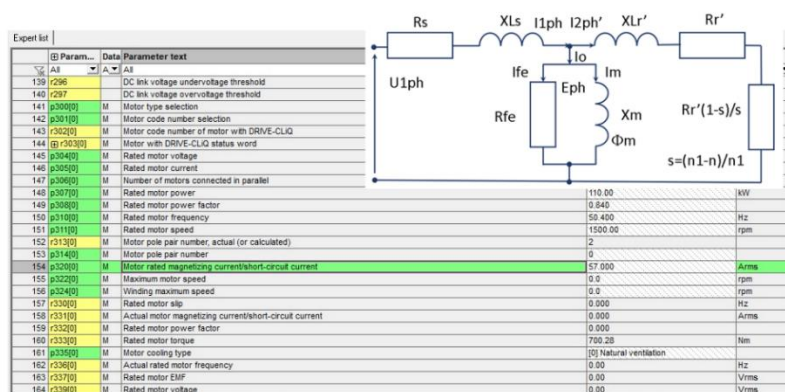
Relacje występujące pomiędzy wielkościami wyjściowymi przemiennika częstotliwości, a polowo-zorientowanymi składowymi I_{sd} i I_{sq} można wyznaczyć wówczas, gdy posiadamy informację o położeniu kątowym wektora strumienia (kąt ρ) [11].

3. Parametry schematu zastępczego modelu silnika

W polskim górnictwie odkrywkowym wiele maszyn górniczych zostało zmodernizowanych w oparciu o technikę napędową i rozwiązania firmy Siemens. Napędy analogowe prądu stałego zamieniono na napędy cyfrowe prądu przemiennego. Zastosowano głównie napędy SIMOVERT

MASTERDRIVES Vector Control oraz SINAMICS S (nowszy model przemiennika, zastępujący rodzinę SIMOVERT). Przeprowadzone badania dotyczyły obu grup napędów, ale w rozdziale koncentrujemy się na rozwiązaniach z napędami SIMOVERT MD VC. W kolejnych publikacjach będziemy odnosić się do niewrażliwych punktów związanych z retrofitem analogowej techniki napędowej.

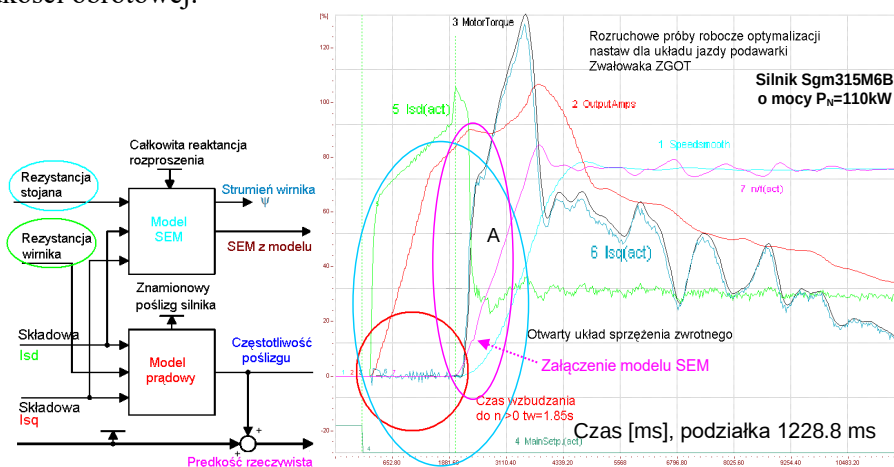
Na rysunku 4 przedstawiono model obiektu, jakim jest silnik indukcyjny i jego schemat zastępczy, którego model matematyczny wyprowadza się z równań klasycznych przy uwzględnieniu powszechnie stosowanych założeń upraszczających [12, 13]. Parametry modelu silnika są wyrażone w jednostkach rzeczywistych (w wewnętrznej strukturze napędu w wartościach względnych procentowych) w układzie współrzędnych związanym z uzwojeniem stojana.



Rys. 3. Parametry zastępcze silnika w oprogramowaniu narzędziowym falownika SINAMICS S wraz ze schematem zastępczym typu T. Podobny model zastosowano w starszej generacji przemiennika SIMOVERT [opracowanie własne na podstawie [12, 13, 14]]

gdzie: R_s – rezystancja uzwojenia stojana, R_r' – rezystancja uzwojenia wirnika sprowadzona na stronę uzwojenia stojana, X_{LS} – reakcyjność rozproszenia (indukcyjność) uzwojenia stojana, $X_{r'}$ – reakcyjność rozproszenia (indukcyjność) uzwojenia wirnika sprowadzona na stronę uzwojenia stojana, X_m – reakcyjność 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 5 przedstawiono fragment diagramu funkcyjnego dotyczącego rozwiązania producenta przemiennika w zakresie dwóch modeli zastępczych silnika wynikających z wyboru algorytmu oraz zakresu prędkości obrotowej.

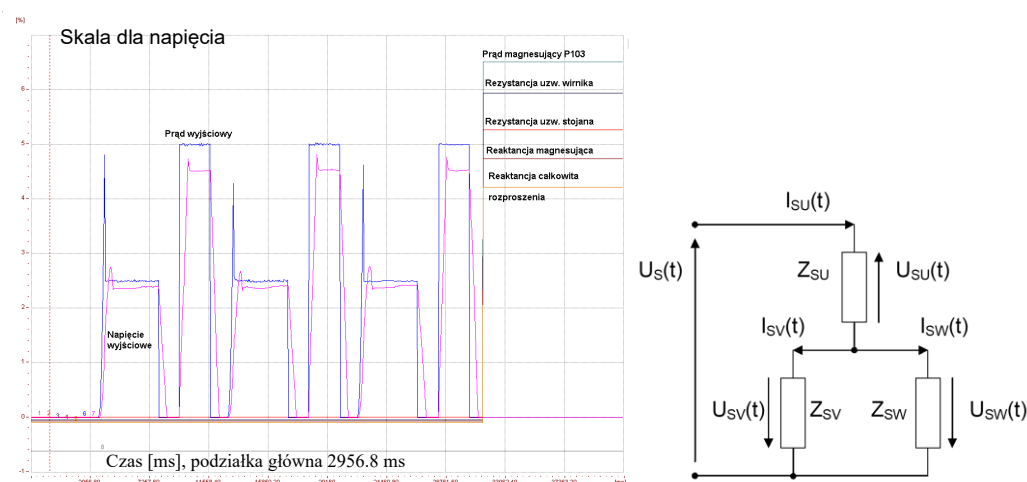


Rys. 4. Model zastępczy silnika indukcyjnego w odniesieniu do przebiegów rozruchowych podczas realizacji bez czujnikowego algorytmu sterowania w układzie jazdy Zwałowarki ZGOT [opracowanie własne na podstawie [1, 2]]

Zauważamy rozwiązanie, które wyodrębnia model prądowy (część prądowa wykresu wskazowego dotycząca składowych prądu I_{sd} i I_{sq}) oraz model napięciowy (część napięciowa – wielkością wyjściową jest wartość siły elektromotorycznej SEM oraz wartość strumienia magnetycznego). Regulator siły elektromotorycznej, który jest regulatorem PI odpowiada za regulację zadanej wartości napięcia wewnętrznego. Model zastępczy silnika w algorytmie sterowania wektorowego analizowanego układu komercyjnego ma następującą realizację praktyczną: blok modelu SEM oznaczonego SEM (rezystancja stojana R_s , rezystancja wirnika R_r , całkowita reaktancja rozproszenia X_k), blok modelu prądowego (składowe prądu stojana I_{sd} oraz I_{sq} , rezystancja wirnika R_r , poślizg s), regulator SEM (wzmocnienie K_p , stała czasowa T_n), blok regulatora SEM - regulacja składowej P (człon proporcjonalny), która działa głównie w chwili przełączania pomiędzy modelami (maksymalne oscylacje $\Delta f = 2\%$ częstotliwości znamionowej f_{1N}) oraz blok ze składową całkującą regulatora SEM, który działa w chwili przełączenia na model napięciowy (wartość maksymalna $f_{max} = 15\%$ częstotliwości znamionowej f_{1N}), człon histerezy odpowiadający za załączanie i wyłączanie modelu SEM (domyślnie – działa powyżej ok. 10% wartości zadanej przy rozruchu oraz poniżej 10% wartości zadanej podczas procesu hamowania). Na rysunku 5 zaprezentowano, zarejestrowaną w trakcie wykonanych badań, pracę bez czujnikowego algorytmu sterowania w układzie aplikacji napędów jazdy Zwałowarki ZGOT w przypadku cyklu roboczego z operatorem. Zaznaczono stan przełączenia pomiędzy modelem zastępczym SEM, a modelem prądowym (układem zadawania prądu) oraz opisano przebiegi wartości zadanej, prędkości, prądu, momentu. Zauważamy, że w źle dostrojonym układzie mogą pojawiać się oscylacje po przełączeniu modeli i które mogą być źródłem drgań. W przyszłości będą również źródłem uszkodzeń konstrukcji mechanicznych, gdyż w układzie występują zależne od cyklu roboczego elektromagnetyczne stany przejściowe, a struktura regulacji, jeśli nie została zweryfikowana i nie jest właściwie dobrana do pracy, będzie wręcz niebezpieczna do dalszej eksploatacji. Taki problem często zgłaszają służby utrzymania ruchu badanych maszyn w PGE KWB Turów i PGE KWB Bełchatów. Potwierdzeniem tego są również publikacje pracowników PGE [5, 18, 19].

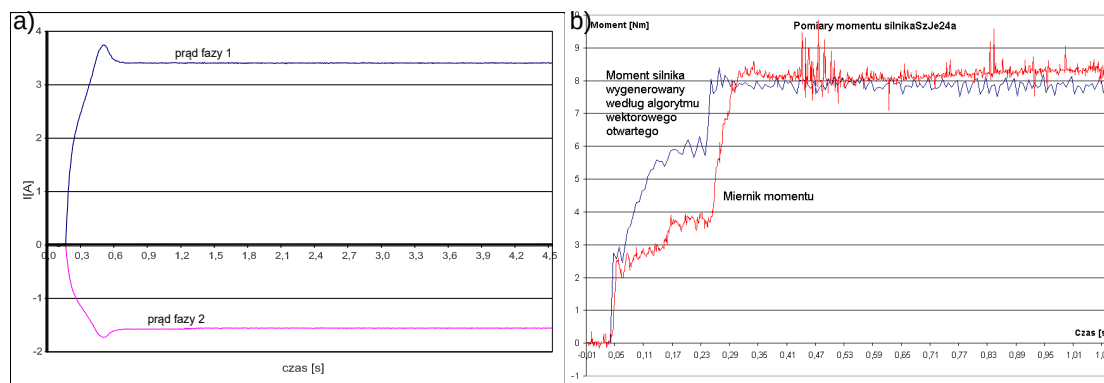
4. Identyfikacja parametrów schematu zastępczego silnika

Identyfikacja parametrów zastępczych jest głównym sposobem pomiaru parametrów schematu zastępczego silnika oraz podstawą funkcjonowania nowoczesnych napędów w procesach technologicznych. Najczęściej identyfikacja wykonywana jest w stanie nieruchomego wirnika, w którym wirnik silnika nie może wykonywać ruchu obrotowego w czasie przeprowadzania próby identyfikacji [15].



Rys. 6. Identyfikacja parametrów modelu zastępczego silnika w stanie nieruchomego wirnika - silnik Sg90L4 o mocy $P_n = 1,5$ kW, nastawa prądu magnesującego $I_m = 0\%$, [opracowanie własne na podstawie [2]]

Metoda ta należy do grupy metod statystycznych, a jej istotą jest analiza odpowiedzi prądowej silnika na zadany skok napięcia stałego (rys. 6). Parametry schematu zastępczego silnika wyznacza się poprzez porównanie przebiegów odpowiedzi prądowych badanego obiektu i jego modelu. Metoda w sposób iteracyjny poszukuje takich współczynników w równaniach modelu, aby różnica pomiędzy przebiegiem otrzymywanym z modelu, a przebiegiem zarejestrowanym z obiektu była równa zero lub też pomijalnie mała. Silnik podczas testów jest zasilany napięciem stałym, a zatem nie wytwarza wirującego pola magnetycznego oraz momentu obrotowego. W czasie próby, symetryczne uzwojenia fazowe stojana są połączone jak na rysunku 6, natomiast na rysunku 7 a) przedstawiono przebiegów prądów w poszczególnych fazach, a na rysunku 7 b) przebiegi momentów zarejestrowanych za pomocą rejestratora wbudowanego w oprogramowanie przemiennika oraz zarejestrowanego za pomocą momentomierza indukcyjnego.



Rys. 7. Przebieg wartości chwilowych: a) prądów 1-szej i 3-ciej fazy silnika Sg90L4 w trakcie wzbudzenia; b) momentu napędowego silnika SzJe24a zarejestrowanego w celu porównania rejestracji za pomocą techniki BICO oraz za pomocą momentomierza indukcyjnego [opracowanie własne na podstawie [2]]

Zależność określającą przebieg czasowy prądu w odpowiedzi na zadany skok jednostkowy napięcia stałego wyprowadzamy następująco [15]:

$$I_s(t) = A_0 + A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (4)$$

gdzie: $T_1 = -\frac{1}{p_1}$; $T_2 = -\frac{1}{p_2}$; p_1, p_2 – pierwiastki równania charakterystycznego

Szukane parametry schematu zastępczego silnika są opisane następująco:

$$R_s = \frac{2 U_s}{3 A_0} ; T_r = \frac{A_1}{A_2} (T_1 - T_2) + T_1 = T_2 - \frac{A_2}{A_0} (T_1 - T_2) ; T_s = T_2 + T_1 - T_r, \sigma = \frac{T_r T_s}{T_1 T_2} \quad (5)$$

Przy założeniach upraszczających, można wyznaczyć parametry L_s , L_r , L_m oraz R_r .

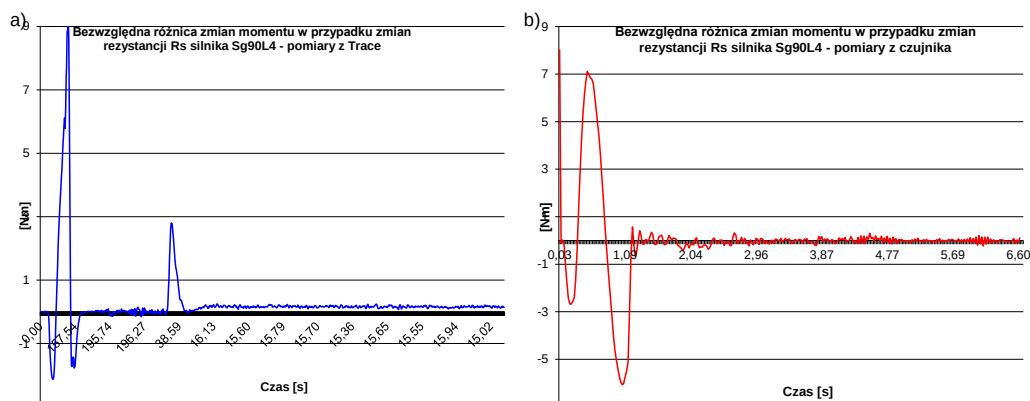
W tabeli 1 zestawiono parametry uzyskane z identyfikacji różnych silników współpracujących z falownikami o sterowaniu wektorowym za pomocą metod zaimplementowanych w przemiennikach SIMOVERT VC.

Zestawienie parametrów silników indukcyjnych wyznaczonych za pomocą metod identyfikacji parametrów - moment bezwładności pobrano z danych katalogowych [2]

Tabela 1

Typ silnika	Sf132M4	Svg315S4	mSvg355M4	S6h560L4
Moc [kW]	7,5	110	250	1250
Napięcie [V]	380	380	380	690
J [kg*m ²]	0,0350	1,6700	6,8000	68,5000
R _s [Ω]	1,8420	0,0416	0,0104	0,0060
R _r [Ω]	1,3350	0,0187	0,0135	0,0040
L _m [H]	0,2389	0,0300	0,0198	0,0069
L _{sr} [H]	0,0074	0,0012	0,0005	0,0002
L _{rr} [H]	0,0141	0,0012	0,0010	0,0003
L _s [H]	0,2463	0,0313	0,0203	0,0071
L _r [H]	0,2530	0,0313	0,0208	0,0072

W procesie identyfikacji silników wyznaczane są zarówno podstawowe parametry, jak również stałe elektromechaniczne napędów określające nastawy wymagane parametrem. W przypadku bez czujnikowego sterowania wektorowego, czynnikiem o dużym znaczeniu jest dokładność określenia wartości rezystancji uzwojenia stojana. Gdy określona wartość rezystancji jest mniejsza od wprowadzonej do modelu (na zaprezentowanym przykładzie o ok. 1,5 Ω), układ dostosowując parametry początkowego etapu procesu rozruchowego do tak narzuconych warunków, stosownie zwiększa napięcie w celu kompensacji jego spadku na rezystancji uzwojeń.

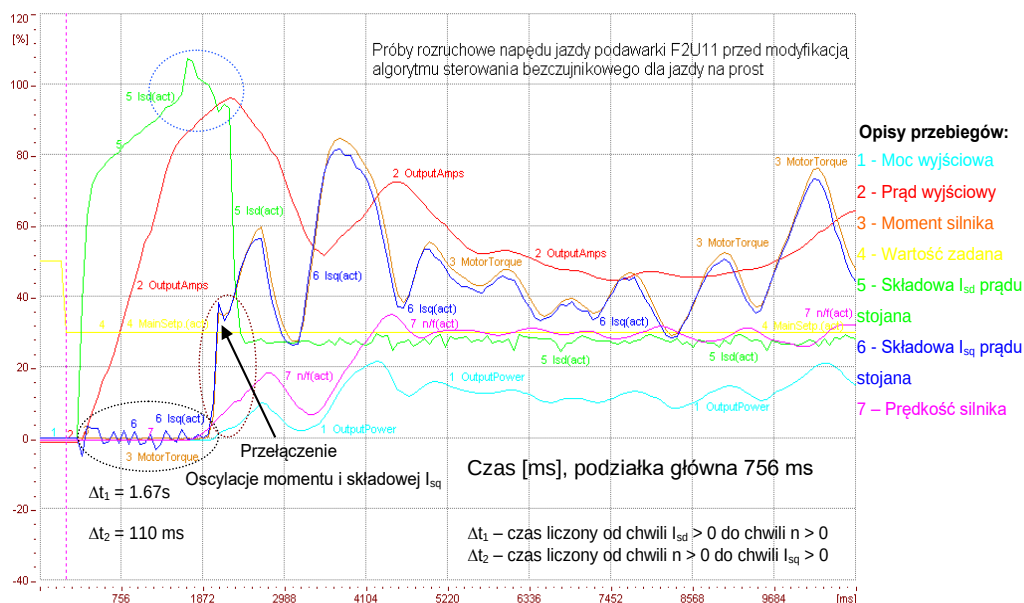


Rys. 8. Zestawienie bezwzględnej różnicy momentów silnika w przypadku zmian rezystancji stojana: a) pomiar przeprowadzono za pomocą oprogramowania przemiennika; b) pomiar przeprowadzono za pomocą cyfrowej rejestracji momentu silnika na stanowisku pomiarowym [opracowanie własne na podstawie [2]]

W konsekwencji, prędkość rzeczywista wirnika w chwili, gdy zaczyna się jej obliczanie na podstawie prądów fazowych, okazuje się większa niż wymaga tego narzucony algorytm sterowania. Ostatecznym tego efektem jest pojawienie się ujemnego impulsu składowej I_{sq} , a w konsekwencji – momentu napędowego. Zestawienie bezwzględnej różnicy momentów silnika w przypadku zmian rezystancji stojana przedstawia rysunek 8. Sytuacja, w której rezystancja modelu jest zaniżona w odniesieniu do rezystancji rzeczywistej, wywołuje skutek odwrotny, lecz w przebiegach prędkości mniej niekorzystny.

5. Wyniki badań polowych algorytmów sterowania w napędach maszyn

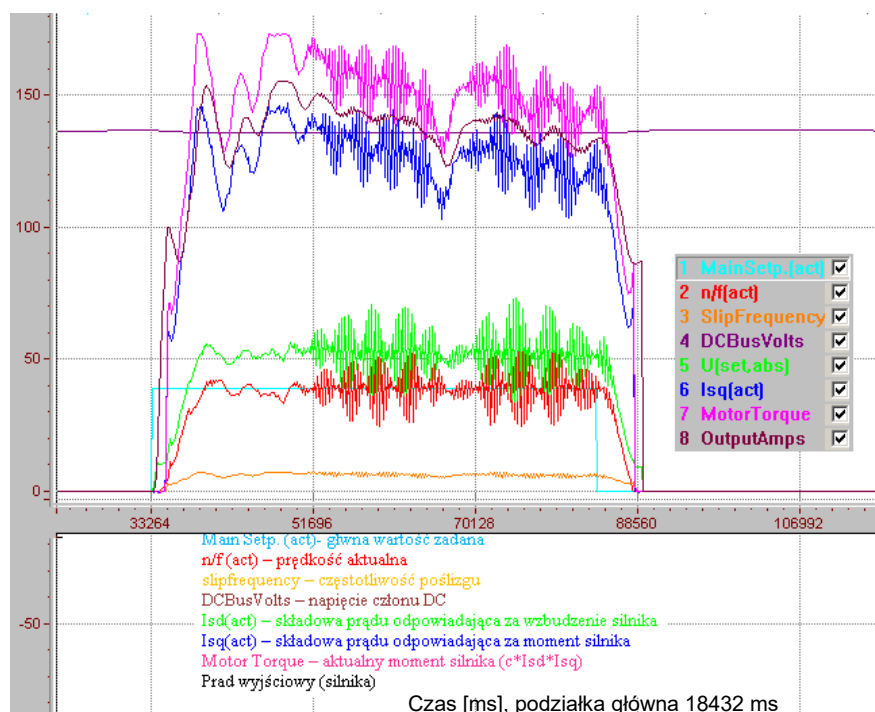
Analizując zamieszczone przebiegi na rysunku 3 i rysunku 5, zauważamy, że we wszystkich przypadkach występuje znaczne przeregulowanie w zadawanej wartości prądu stojana w odniesieniu do składowej I_{sd} . Przyczyną tego jest inercja, z jaką pojawia się strumień Ψ_{rd} w osi wirnika jako odpowiedź na wymuszenie prądowe. Pożądanym jest, aby w chwili pojawiania się składowej I_{sq} prądu stojana, wartość strumienia, a tym wartość składowej I_{sd} była już ustalona. Pozwoli to na wstępne osiągnięcie ustalonego stanu elektromagnetycznego silnika i na regulację jego momentu elektromagnetycznego poprzez sterowanie jedynie wartością składowej I_{sq} . Dodatkowym niepożądanym zjawiskiem są niebezpieczne oscylacje pojawiające się w przebiegach prędkości obrotowej oraz oscylacje w przebiegach prądu i momentu silnika przy przełączaniu modeli, co wymaga weryfikacji, strojenia oraz testów weryfikacyjnych. Wprowadzenie, bowiem różnych od rzeczywistych modelowych wartości nastaw doprowadzić może do sytuacji niebezpiecznych, zagrożenia życia oraz uszkodzeń maszyn.



Rys. 9. Próby rozruchowe napędów jazdy podawarki F2U11 oraz F2U12 bez czujnikowego algorytmu sterowania (silniki Sgm315M6B, $P_N=110$ kW) – badania dotyczą maszyny uruchomionej i oddanej do eksploatacji [opracowanie własne na podstawie [2]]

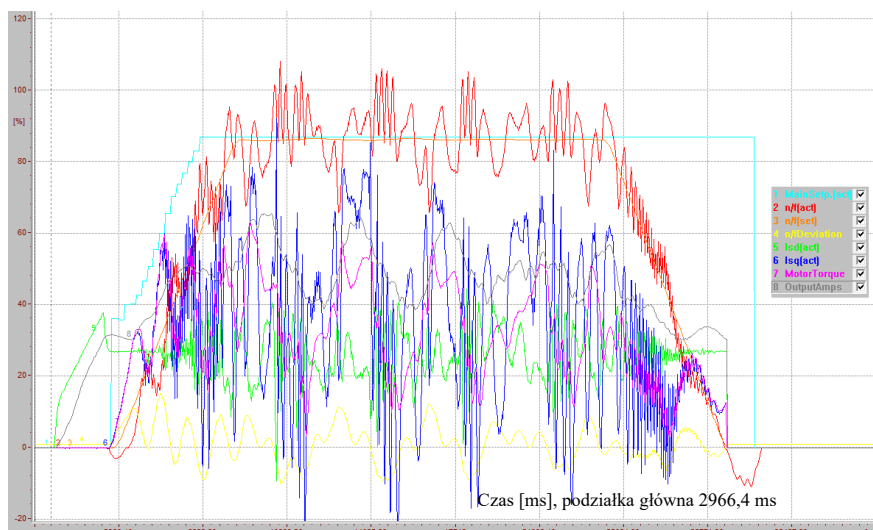
Przebiegi przedstawione na rysunku 9 zostały zarejestrowane w trakcie prób rozruchowych napędu jazdy podawarki F2U11 oraz F2U12 z silnikami Sgm315M6B o mocy $P_N = 110$ kW. Podejmując próbę „naprawy” algorytmu, należy zauważyć, że do struktury algorytmu zostaną wprowadzone zmiany, które mogą wywoływać dodatkowe opóźnienia w układzie sterowania, które mogą, zależnie od cech obiektu, odnieść skutek pozytywny w postaci zmniejszenia oscylacji momentu i składowej I_{sq} . W omawianym przykładzie poprzez zmianę nastaw parametru prądu magnesującego oraz czasu generacji składowej I_{sd} zostanie zmieniony kształt przebiegu składowej I_{sd} (mniejsze przeregulowanie) oraz złagodzony będzie efekt przełączania modeli zastępczych. Główny rezultat modyfikacji to większe opóźnienie pomiędzy generacją prędkości obrotowej, a generacją składowej I_{sq} , co w tym przypadku pozwala na uzyskanie łagodniejszych przebiegów ruchowych i ograniczenie drgań. Należy pamiętać, że układy napędowe pracują w sieciach komunikacyjnych i są sterowane ze sterowników PLC. Program główny znajduje się w sterowniku, ale poszczególne programy funkcyjne/technologiczne są realizowane w przemiennikach (przemiennik jest szybszy i pewniejszy od sterownika oraz komunikacji sieciowej). Zgodnie z zaprojektowanym algorytmem pracy maszyny, sterownik PLC na podstawie informacji

zbieranych z różnych czujników wypracowuje sygnał główny i wysyła go za pomocą sieci komunikacyjnej, jako wartość zadaną, do sterowania pracą falowników. Przy uruchamianiu programów na obiekcie rzeczywistej maszyny górniczej, powinno się dysponować wstępnymi nastawami regulacji obliczonymi przez projektanta lub zweryfikowanymi na obiekcie modelowym. W przeciwnym przypadku pojawia się niewiedza spowodowana np. wartościami momentów w stanach dynamicznych, niedoszacowaniem obliczeń elektromechanicznych lub brakiem informacji o wzajemnych interakcjach zaprojektowanych algorytmów sterownia. Modernizując maszynę sterowaną napędami prądu stałego przy przejściu na technikę falownikową prądu przemiennego zwykle przelicza się tylko prąd i moment w odniesieniu do warunków statycznych. Falowniki są dużo szybsze od przekształtników pomimo, iż sam silnik prądu stałego jest dynamiczną maszyną i ma wiele zalet. Jeśli jednak nie uwzględnia się sposobu reakcji urządzeń falownikowych i negatywnego oddziaływania na elementy sprzęgów mechanicznych, łożyska, przekładnie oraz konstrukcję modernizowanej maszyny, to wówczas w trakcie uruchamiania maszyny i samej eksploatacji powstaje wiele niepotrzebnych awarii i zagrożeń – rysunek 10 i rysunek 11.



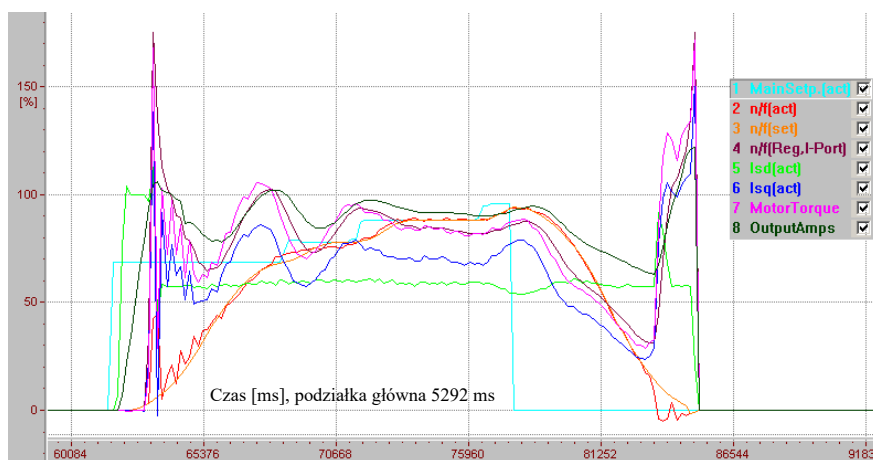
Rys. 10. Przebiegi rozruchu w trakcie prób roboczych nadwozia maszyny PGOT 4500 - praca przenośnika zdającego D2U1 – warunki atmosferyczne: zima, mróz, temperatura - 18°C
[opracowanie własne na podstawie [1]]

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono przebiegi z prób ruchowych przenośnika samojednego PGOT. Widoczne drgania w trakcie prób, maszyna zatrzymuje się od zabezpieczeń drganiowych. Zdolność manewrowa maszyny ograniczona, operator nie wykonuje pełnych ruchów sterowniczych w obawie o uszkodzenia mechaniczne. Badana maszyna została oddana do eksploatacji. W ramach pomocy, podjęto działania, które znacząco wyeliminowały problemy drganiowe oraz poprawiły zdolność manewrową zarówno pod względem obrotu, jak również pod względem napędów jazdy.



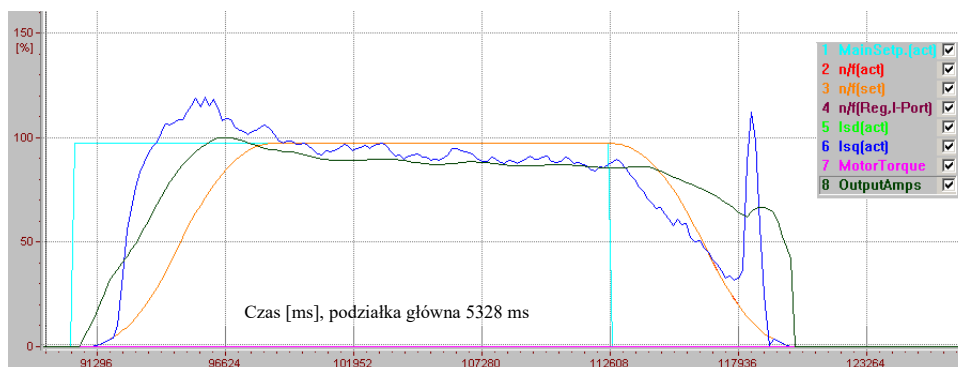
Rys. 11. Próby rozruchowe napędów jazdy maszyny PGOT F1U4 podczas jazdy na wprost z wektorowym algorytmem sterowania – badania dotyczą maszyny uruchomionej i oddanej do eksploatacji [opracowanie własne na podstawie [1]]

Przebiegi przedstawione na rysunku 12 i rysunku 13 przedstawiają kolejny etap badań zdolności ruchowych maszyny górniczej, który jednocześnie stanowi dowód konieczności eliminacji opisanych w rozdziale zjawisk niekorzystnych i niebezpiecznych. Podejmując próbę naprawy pracy algorytmu przedstawionego na rysunku 12, zweryfikowano nastawy podstawowe i parametry funkcyjne [2].



Rys. 12. Przebiegi ruchowe przenośnika odbierającego D1U1 po zastosowaniu wektorowego algorytmu sterowania z czujnikiem prędkości [opracowanie własne na podstawie [1]]

W tym konkretnym przypadku, przedstawionym na rysunku 13 został wydłużony czas generacji wartości aktualnej składowej I_{sq} , co pozytywnie wpłynęło na przebiegi ruchowe w stanach dynamicznych w odniesieniu do niskiego zakresu prędkości obrotowych. Zauważmy, jak złagodzona zostaje generacja składowej I_{sd} , szczególnie w początkowej fazie rozruchu. Bardzo ważnym skutkiem wprowadzonej zmiany jest to, że przebiegi składowych prądu stojana, momentu silnika oraz prędkości zostały wyraźnie złagodzone, przy zachowaniu tych samych parametrów ruchowych.



Rys. 13. Poprawa algorytmu sterowania przenośnikiem D1U1 za pomocą zmiany nastaw parametrów [opracowanie własne na podstawie [1]]

W odniesieniu do początkowego zakresu częstotliwości $f < 10\%f_{IN}$ została także złagodzona faza wyłączenia napędu oraz potwierdzony został efekt zmniejszenia oscylacji momentu i składowej I_{sq} oraz korzystny kształt przebiegu składowej I_{sd} . Podsumowując można stwierdzić, że zastosowanie opracowanego rozwiązania pozwoliło na wyeliminowanie związanych z oscylacjami i przekraczaniem ograniczeń prądowych oraz pozwoliło na płynną regulację prędkości.

6. Modyfikacja algorytmów sterowania

Fakt, iż maszyny górnicze zostały odebrane i pracują, nie oznacza, że są właściwie sterowane. Urządzenia elektromechaniczne zmieniają swoje parametry podczas pracy, a parametry obiektów regulacji są zależne np. od zmian temperatury i się zmieniają. Osadzanie się błota i lodu na elementach mechanicznych oraz zmiany właściwości smarnych i lepkości płynów eksploatacyjnych stanowią dodatkowe utrudnienie i mogą powodować przeciążenia zarówno konstrukcji, jak również błędy od ograniczeń momentowo-prądowych. Brak jest w tym zakresie wyników badań, na ile zwiększają się wówczas momenty oporów ruchu, a mogą to być krotności znaczne, które są często niedoszacowane. Zagadnienia właściwej oceny tych zmian oraz właściwego doboru nastaw struktur regulacji są złożone i wymagają analizy wielu czynników oraz dużego doświadczenia w tym zakresie. Szczególnie dotyczy to techniki falownikowej i komunikacji sieciowej za pomocą sieci przemysłowych. Aktualnie napędy prądu przemiennego bardzo często są niedoszacowane pod względem mocy, co wynika również z tworzenia maszyn – prototypów, maszyn unikatowych, specjalistycznych i dedykowanych, w których pozorna oszczędność początkowa może powodować znaczne straty w trakcie eksploatacji maszyny. Problemy te były poruszane w publikacjach [16, 17, 18, 19].

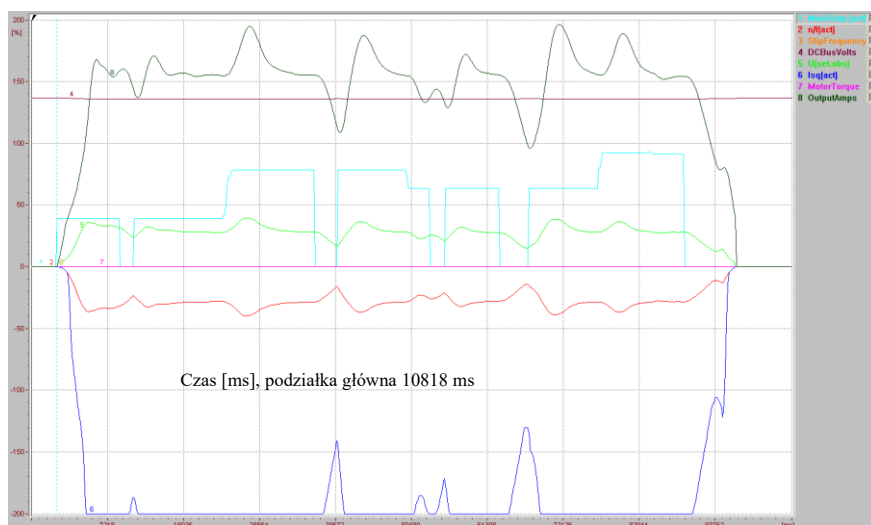
W trakcie prac badawczych i ekspertyz koncentrowano się również na opracowaniu i implementacji opisywanych rozwiązań, tak, aby stały się bezpośrednio pomocne w pracy maszyn górniczych.

Na rysunku 14 przedstawiono przebiegi ruchowe odnoszące się do zastosowanego wektorowego algorytmu sterowania przenośnikiem zdawczym maszyny PGOT oraz rejestrację dotyczącą przenośnika zdawczego i obrotu nadwozia D2U1 odnoszącą się do napędów grupowych i wektorowego algorytmu sterowania. Przebiegi stanowią przykład źle dobranych parametrów napędów obrotu przenośnika, co przy zmiennych warunkach pogodowych i osadzaniu się zmarzlin na elementach mechanicznych nie pozwala na stabilną pracę maszyny. Zauważamy, że w trakcie pracy system sterowania pobudza konstrukcję do drgań. Oscylacje pojawiają się w przebiegu prądu i jego składowych oraz przebiegach momentu, prędkości. Taki stan jest niedopuszczalny z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy oraz zagrożenia dla obsługi i konstrukcji maszyny.



Rys. 14. Przebiegi ruchowe odnoszące się do wektorowego algorytmu sterowania przonośnikiem PGOT - przonośnik zdawczy – obrót nadwozia D2U1 – grupowy układ sterowania odnoszący się do algorytmu wektorowego [opracowanie własne na podstawie [1]]

Przed wprowadzeniem zmian dokonano weryfikacji wprowadzonych nastaw parametrów modeli zastępczych, wybranego algorytmu i nastaw struktur regulacji. Zaproponowano zamiany z strukturze algorytmu i nastawach parametru. Maszyna przed zmianami algorytmu posiadała problem z rozruchem i poprawną pracą. Jako środek zaradczy, wprowadzono metodę sterowania grupowego skalarne - zmiany zadziały pozytywnie – rysunek 15.



Rys. 15. Modyfikacja algorytmu sterowania przonośnikiem PGOT - przonośnik zdawczy – obrót nadwozia D2U1 – grupowy układ sterowania po modyfikacji zastosowano algorytm skalarne [opracowanie własne na podstawie [1]]

Maszyna przonośnika samojezdnego PGOT aktualnie posiada dużo większe zdolności manewrowe wysięgnika odbierającego i nie ma problemów z drganiami, które jako nastawy zabezpieczeń, wyłączały falowniki w trakcie pracy. Natomiast w sezonie zimowym pojawił się problem z rozruchem na skutek niedoszacowanych pod względem mocy napędów. Na częściową eliminację problemu pozwoliła ponowna identyfikacja i strojenie parametrów regulacji. Problem niedoszacowanych pod względem mocy napędów prądu przemiennego zastępujących napędy prądu stałego również poruszano w wielu publikacjach, np. [2, 5].

7. Dyskusja

Zdaniem autorów, powinno się opracować właściwe standardy i skorygować istniejące procedury doboru i odbioru napędów falownikowych przeznaczonych do nowych lub modernizowanych maszyn górniczych poprzez obliczenia, symulacje oraz wykonanie kontrolowanych przeciążeń zarówno dynamicznych, jak i statycznych uwzględniając realne warunki pracy maszyn zarówno w dniu odbioru, jak również przez cały rok. Sugestią autorów jest, aby:

- Przed przystąpieniem do modernizacji dokładnie przeanalizować maszyny i funkcjonujące algorytmy sterowania oraz dobrane parametry regulacji.
- W trakcie modernizacji należy powyższy algorytm odwzorować, a dopiero w dalszej kolejności próbować wdrażać nowatorskie rozwiązania, wykorzystujące możliwości nowoczesnego sprzętu.
- Do napędów jazdy nie stosować układu z jednakowymi momentami na wszystkich silnikach, a w napędzie obrotu należy stosować inny zestaw parametrów do jazdy w lewo, a inny do jazdy w prawo.
- Wpływ wprowadzanych zmian w sterowaniu powinien być wszechstronnie przeanalizowany i skontrolowany po wdrożeniu. W pracach modernizacyjnych algorytm sterowania powinien być uzgodniony przez wszystkie zaangażowane firmy projektowe.
- Sterowanie skalarne stosować w napędach grupowych, szczególnie w napędach obrotu wraz z dokładną parametryzacją nastaw i ograniczeń, a całość należy poddać testom i weryfikacji odnośnie eliminacji drgań i wibracji w układzie napędowym.
- Sterowanie wektorowe wymaga poprawnej parametryzacji modelu zastępczego oraz zastosowania metod identyfikacji i parametryzacji ograniczeń, a całość należy poddać testom i weryfikacji odnośnie eliminacji drgań i wibracji w układzie napędowym.
- Pamiętać, że komunikacja sieciowa w warunkach górniczych jest trudna w realizacji i podatna na zakłócenia. Z tego powodu często wprowadza dodatkowe opóźnienia w strukturze regulacji, a tym samym w realizacji zaprojektowanego algorytmu sterowania maszyną.
- Sprawdzać, ewentualnie obliczać parametry zastępcze silników i wartość prądu magnesującego.
- Obliczać parametry zastępcze silnika w różnych temperaturach i na tej podstawie stosować funkcję adaptacji zmian rezystancji zastępczej uzwojenia wirnika a następnie zaimplementować to w nastawach.
- Powtarzać identyfikację i stosować indeksowanie nastaw parametrów zastępczych w odniesieniu do różnych warunków eksploatacyjnych, awaryjnych, pogodowych i uwzględniających pory roku.
- Przeprowadzać cykliczną optymalizację nastaw struktur regulacji poprzez weryfikację w różnych trybach pracy.
- Po wymianie np. uszkodzonych silników napędowych, czy przekładni mechanicznych, procedurę identyfikacji i optymalizację powinno się powtórzyć.
- Można rozważyć możliwość zastosowania adaptacji parametrów zastępczych w algorytmie sterowania napędami jazdy, co powinno uwzględniać zmiany parametrów rzeczywistego obiektu sterowania w różnych temperaturach (wpływ temp. otoczenia i modelu temperaturowego).
- W zakresie programu sterowania proponuje się sprawdzenie budowy pętli regulacji – najprawdopodobniej przy takiej strukturze czasy regulacji są za długie. Momenty są uśrednione

i odfiltrowane, co nie przenosi właściwych wartości aktualnych. Nowe wartości zadane są odczytywane przez napęd, co ok. 0,5 s. Trudno tutaj pisać o dynamice napędów, gdyż wszystko dzieje się po stronie systemu elektromechanicznego.

8. Podsumowanie, uwagi i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i zgromadzonych doświadczeń autorzy sugerują opracowanie odnoszących się do eksploatowanych maszyn górniczych wytycznych umożliwiających adaptację nastaw uwzględniających pory roku i zmiany parametrów podłoża oraz parametrów zastępczych silników napędowych. Przeprowadzanie okresowych przeglądów wszystkich lub wybranych przez kopalnie maszyn, które były uruchamiane w oparciu o falownikową technikę napędową również pozwoli na wcześniejszą identyfikację problemów. W przypadku maszyn o znaczeniu strategicznym, sugerujemy zastosowanie dodatkowych urządzeń rejestrujących, które będą pełniły rolę akwizytora danych. Można również podłączać dodatkowe komputery z dedykowanym oprogramowaniem rejestrującym (czyli dodatkowe panele HMI), co pozwoli na ciągłe monitorowanie i wykonywanie rejestracji roboczych oraz zbudowanie bazy wiedzy o maszynie. Na tej podstawie powinno nastąpić, w ramach współpracy nauki z przemysłem, opracowanie środków zaradczych i prewencyjnych. Pragniemy zauważyć, że długie opóźnienia w pętlach sprzężenia zwrotnego mogą powodować chwilowe utraty stabilności układów sterowania maszyn górniczych. Aby temu przeciwdziałać proponujemy bieżące obliczanie parametrów zastępczych silników w różnych temperaturach i na tej podstawie proponowanie np. implementację funkcji adaptacji zmian rezystancji zastępczej uzwojenia wirnika zależną od zmian temperatury, którą można następnie szeroko implementować w nastawach pozostałych typach maszyn górniczych.

Poprawę właściwości regulacyjnych, szczególnie w trudnych warunkach pracy urządzenia, można uzyskać poprzez uwzględnienie w obliczeniach parametrów silnika, zmian rezystancji wirnika pod wpływem temperatury. Dla poprawnej realizacji wybranego algorytmu wektorowego, określenie wartości prądu magnesującego jest sprawą kluczową. Podsumowując, nastawy parametrów odwzorowujące model silnika oraz podstawowe cechy zespołu napędowego są kwestią kluczową. Nie możemy bazować tutaj wyłącznie na procedurach tzw. auto-tuningu, gdyż tak skonfigurowane i nierozpoznane pod względem technik regulacyjnych maszyny stanowią następnie realne zagrożenie dla obsługi i eksploatacji.

Literatura

1. Jabłoński M.: Ekspertyza przenośnika samojezdnego PGOT-4500. Protokół z wykonanych prac, zlecenie HP/AG-W26/09. PGE KWB Turów S.A.
2. Jabłoński M.: Analiza parametrów funkcyjnych oraz modyfikacja algorytmów sterowania polowo-zorientowanego napędu falownikowego z silnikiem indukcyjnym. Praca doktorska, PŁ 2006.
3. Hertel L.: Technika przekształtnikowa w napędach jazdy i obrotu na maszynach podstawowych – doświadczenia eksploatacyjne, str. 38, Górnictwo Odkrywkowe 1 (2008).
4. Jabłoński M., Anuszczyk J.: Współczesne algorytmy sterowania maszyn górnictwa odkrywkowego w przykładach aplikacyjnych. VII Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego 2011 „Węgiel Brunatny - Energia - Rozwój”.
5. Hertel L., Nowacki H.: Algorytmy sterowania napędami na modernizowanych koparkach. Górnictwo Odkrywkowe, str. 39. PGE SA, Oddział KWB Bełchatów w Rogowie.



6. Anuszczyk J., Jabłoński M.: Układy falownikowe w napędach jazdy maszyn górnictwa odkrywkowego. V Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego 2007 „Węgiel Brunatny - Energia - Rozwój”.
7. Dokumentacja SIEMENS dla SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control v.3.2.
8. Blaschke F.: Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronenmaschine. Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte, Vol. 1, pp. 184-193, 1972.
9. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Helion, Gliwice 1998.
10. Tunia H., Kaźmierkowski M.: Automatyka napędu przekształtnikowego. PWN, Warszawa 1987.
11. Pełczewski W., Krynke M.: Metoda zmiennych stanu w analizie Układów napędowych. WNT, Warszawa 1984.
12. Kalus M., Skoczkowski T.: Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego. Gliwice 2003.
13. Vas P.: Sensorless vector and direct torque control. Oxford University Press 1998.
14. Dokumentacja SIEMENS dla SINAMICS S120/S150.
15. Bos A., Orłowska-Kowalska T.: Sterowanie wektorowe silnika indukcyjnego ze wstępną identyfikacją parametrów schematu zastępczego. SENE'2001, tom I, str.: 65-72, Łódź – Arturówek, 2001.
16. 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.
17. Jabłoński M.: II Konferencja Naukowo-Techniczna Elgor 2007. Napędy Urządzeń Górnictwa Odkrywkowego. Optymalizacja struktur sterowania nowoczesnych napędów elektrycznych na przykładzie Sinamics S120.
18. Błaszczuk Ł., Jabłoński M.: Konfiguracja, diagnostyka i wymiana danych procesowych w teleinformatycznych sieciach przemysłowych. Technika Zagraniczna Maszyny, Technologie, Materiały Sigma-Not.
19. Uchroński Ł., Jabłoński M.: Wymiana danych procesowych w aplikacjach przemysłowych. Technika Zagraniczna Maszyny, Technologie, Materiały Sigma-Not.