

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

## WSPÓŁCZESNE ALGORYTMY STEROWANIA MASZYN GÓRNICZWA ODKRYWKOWEGO W PRZYKŁADACH APLIKACYJNYCH

---

### 1. Wprowadzenie

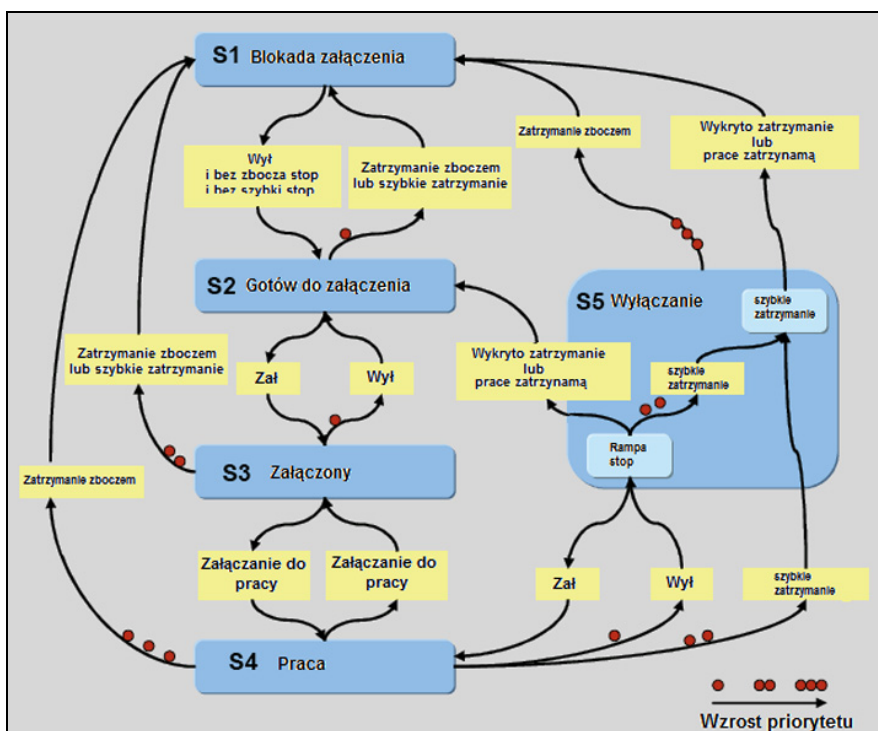
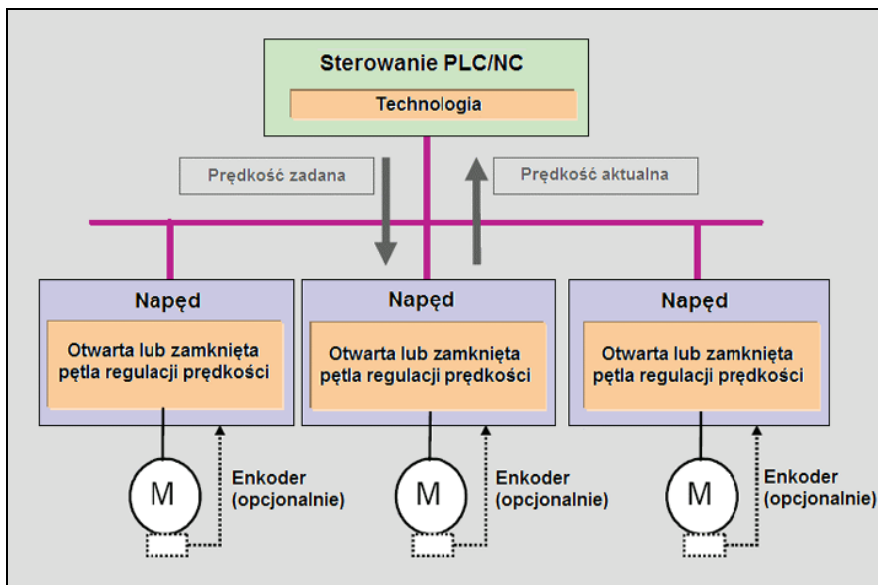
Opracowanie algorytmu i implementacja projektu sterowania maszyny górniczej jest procesem złożonym i składającym się on z wielu etapów. Są to: założenia technologiczne, projektowanie, obliczenia elektromechaniczne parametrów konstrukcyjnych maszyn, projektowanie algorytmów sterowania maszyn, ich modelowanie i symulacja komputerowa, budowa i uruchamianie systemów sterowania, parametryzacja i programowanie oraz optymalizacja nastaw struktur regulacji. Dostępne współcześnie techniki sterowania oferują skalowalność systemu, a automatyzacja oparta jest na integracji funkcjonalności rozwiązań technologicznych z sekwencyjną logiką zawartą w sterownikach programowalnych. Zadania tworzonej aplikacji są optymalizowane przez cykliczne przekazywanie informacji pomiędzy urządzeniami zadającymi i wykonawczymi za pośrednictwem komunikacyjnych sieci przemysłowych (rys. 1).

Dane pomiędzy urządzeniami mogą być wymieniane za pomocą wydzielonej do tego celu sieci światłowodowej, sieci PROFINET lub PROFIBUS DP [6]. Na bazie standardu PROFIdrive dostępny jest opis sekwencji stanów pracy sterowanych urządzeń. Jest to zależne od poziomu zaawansowania i zastosowania skali integracji technologii w strukturze sterowania napędów elektrycznych. Standard pozwala na współdziałanie i podział zadań programów sterujących tworzonych w środowisku programistycznym oraz algorytmów umieszczonych w przestrzeni parametrycznej urządzeń wykonawczych, np. falowników (rys. 2).

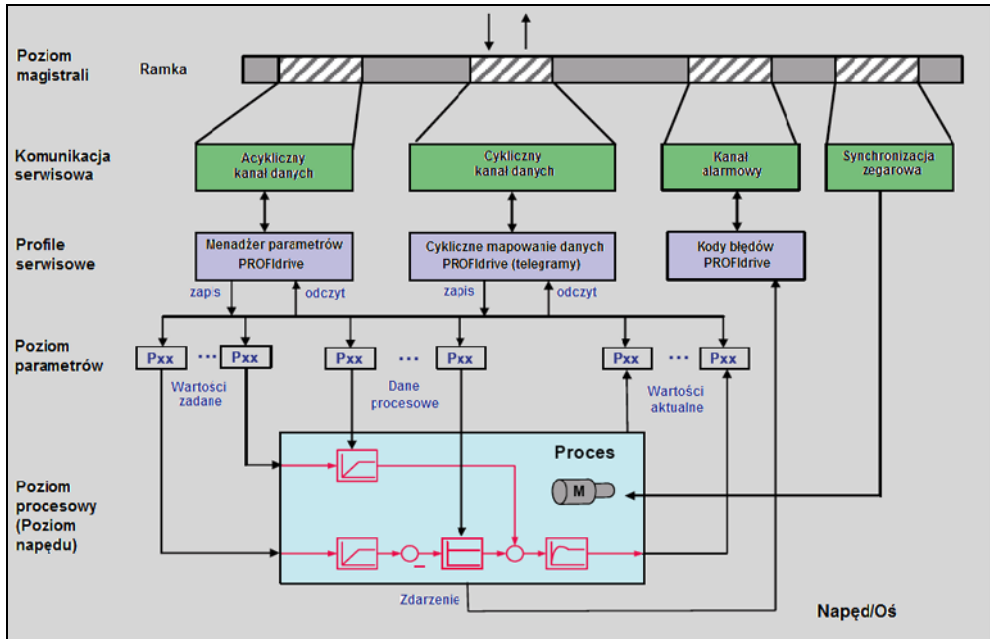
---

\* SIMLOGIC. Centrum Rozwiązań Automatyki, Łódź

\*\* Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka, Łódź



Rys. 1. Projektowanie, programowanie sekwencji i uruchamianie falownikowych urządzeń wykonawczych sterowanych ze sterowników PLC, według danych firmy PROFIdrive

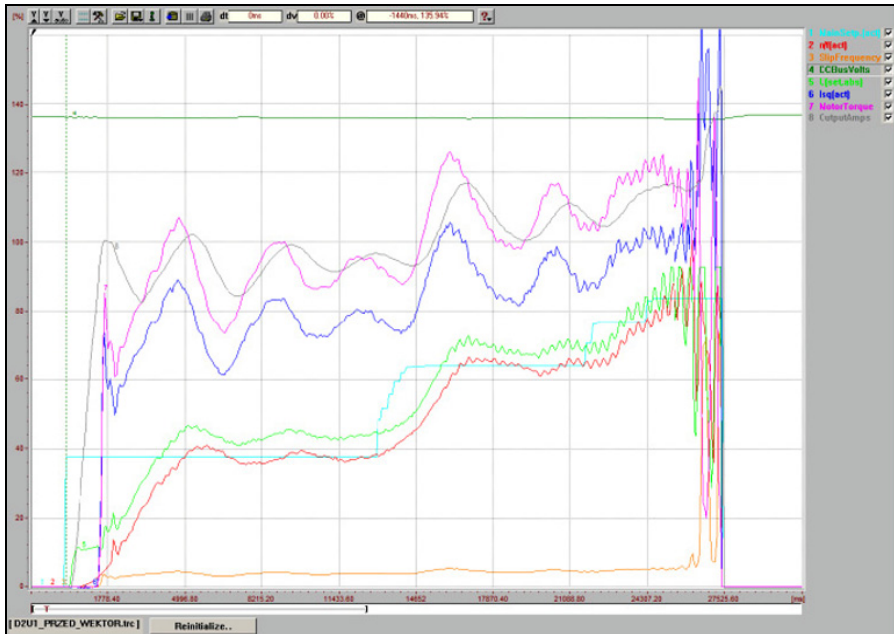
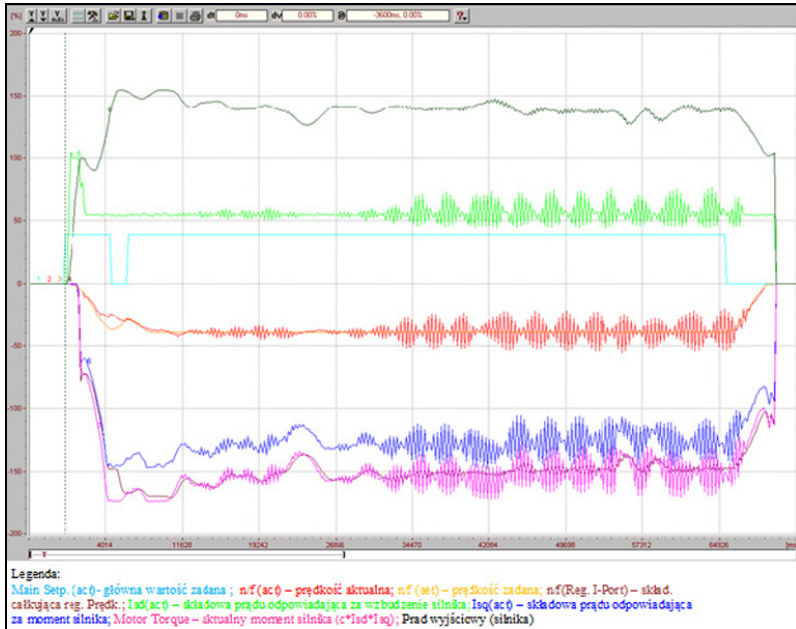


Rys. 2. Poziomy wymiany danych technologicznych według standardu PROFIdrive

Standard dzieli aplikację na poziomy i pozwala na szczegółowy opis zachowania całego systemu napędowego, jego stanów pracy, zmian tych stanów oraz podjętych akcji urządzenia. Standard określa, który ze zdefiniowanych stanów powinien być uruchomiony przy użyciu odpowiedniego polecenia oraz w jaki sposób i przy jakich warunkach powinna zostać wykonana zmiana z jednego stanu do drugiego. Niepełna znajomość modelowych podstaw działania współczesnych napędów elektrycznych od strony sterowania, standardów profili pracy i komunikacji oraz zależności wzajemnych zmian stanów, może powodować niebezpieczne sytuacje podczas prac uruchomieniowych maszyny i problemy w eksploatacji, co przykładowo przedstawia rysunek 3

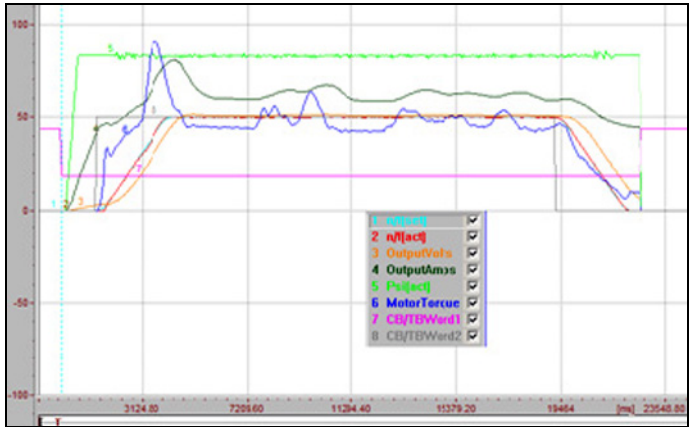
Obecne rozwiązania algorytmów sterowania, stosowane w falownikach umożliwiają:

- wektorową regulację prędkości z zamkniętym sprzężeniem zwrotnym (np. napędy jazdy maszyn górniczych);
- wektorową regulację częstotliwości bez czujnika prędkości obrotowej (np. napędy jazdy podawarki lub napędy z czujnikiem po uszkodzeniu czujnika prędkości);
- wektorową regulację momentu (np. układy nawijania i odwijania bębnow kablowych);
- sterownie skalarne (np. napędy grupowe do obrotu podajnika/wysięgnika);
- regulację *master-slave* (np. napędy obrotu indywidualnie sterowane);
- regulację położenia wału silnika — sterowniki technologiczne.

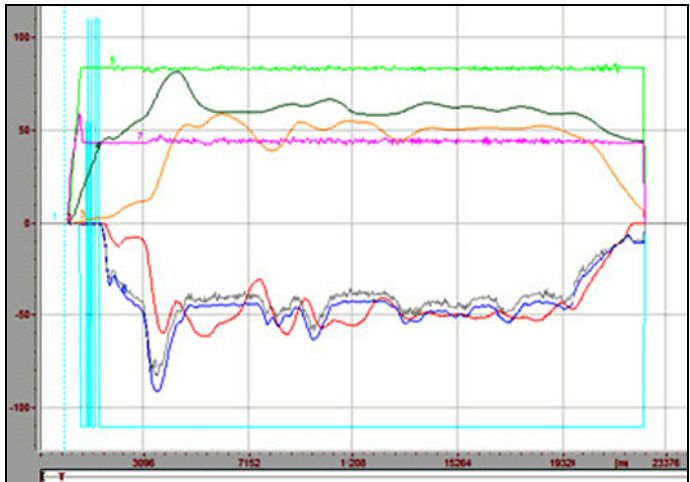


**Rys. 3.** Niepoprawny algorytm sterowania falowników napędów obrotu przenośnika samojezdnego wywołujący drgania konstrukcji oraz ograniczenia zdolności ruchowej maszyny górniczej — badania własne SIMULOGIC

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi dynamiczne napędów obrotu przenośnika samojazdnego, które zostały skonfigurowane do pracy w układzie *master-slave* (nadrzędny — nadążny). Przebiegi rzeczywiste momentu napędowe (nr 6) stanowią odbicie lustrzane. Natomiast prędkość obrotowa napędu *slave* jest wynikiem nadążania momentu za wartością zadaną.



*master*



*slave*

**Rys. 4.** Konfiguracja napędów obrotu zwalówki w trybie *master-slave*  
— badania własne SIMLOGIC

Najczęściej wymiana danych technologicznych pomiędzy jednostkami zadającymi i wykonawczymi jest realizowana za pomocą magistral PROFIBUS DP, światłowodowej lub PROFINET. Prędkość przesyłu danych, wysoki poziom zabezpieczeń i uniwersalność to

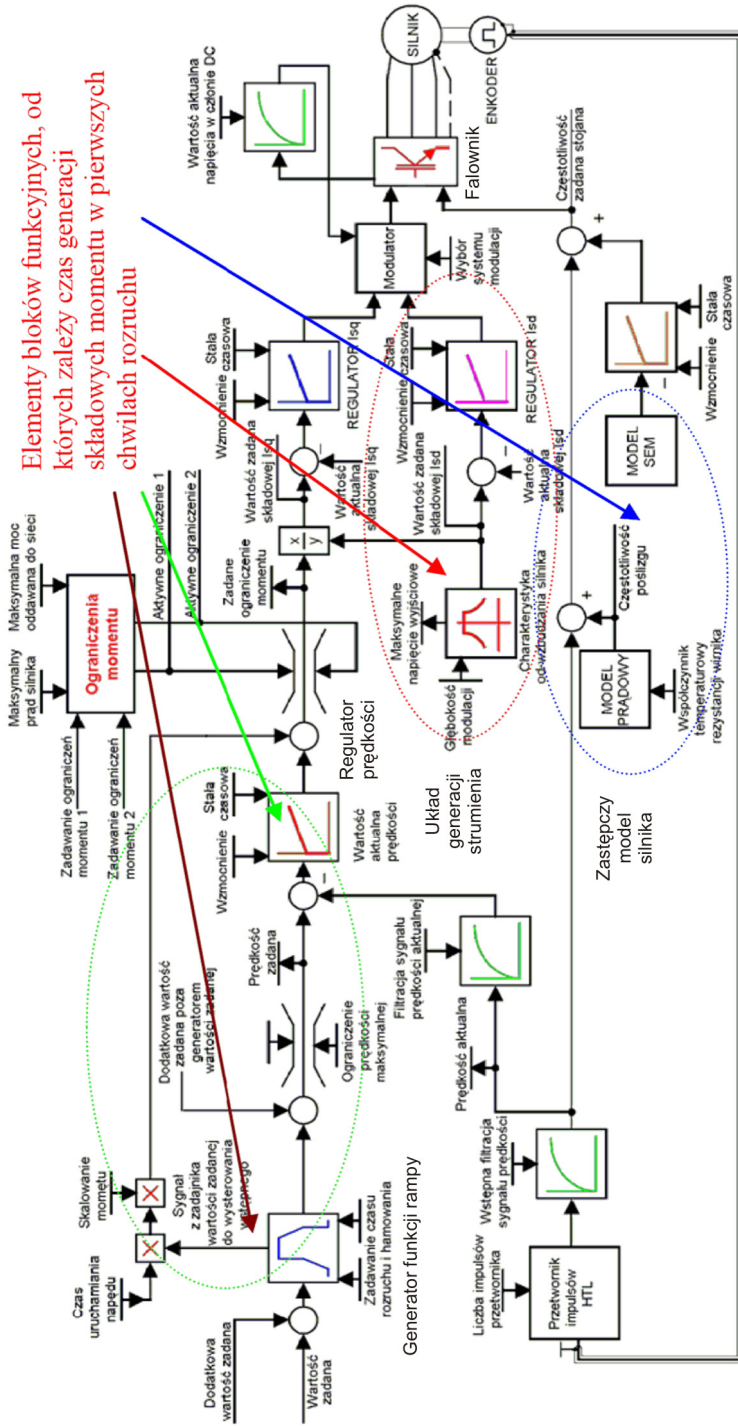
zdecydowanie największe zalety wymienionych standardów komunikacji. Dają one możliwość komunikacji wielu urządzeń i systemów w spójnej technologii i umożliwiają integrację automatyki oraz skalowalność systemów. Należy jednak pamiętać, że w układzie *master-slave* niewłaściwe nastawy regulacji oraz źle użyta funkcja opóźnień (*droop*) mogą powodować nadmierne zużywanie się zespołów mechanicznych i konstrukcji maszyn (ciągłe wahania i oscylacje prędkości, momentu, składowych prądu, nawet przy jeździe na płaskim podłożu). Zbyt wolne nastawy regulacji napędu elektrycznego, w odniesieniu do reakcji systemu sterowania i reakcji podłoża oraz konstrukcji np. po starcie maszyny, mają wyraźny wpływ na naprężenia całej konstrukcji (rys. 3).

## 2. Algorytmy sterowania maszyn górniczych

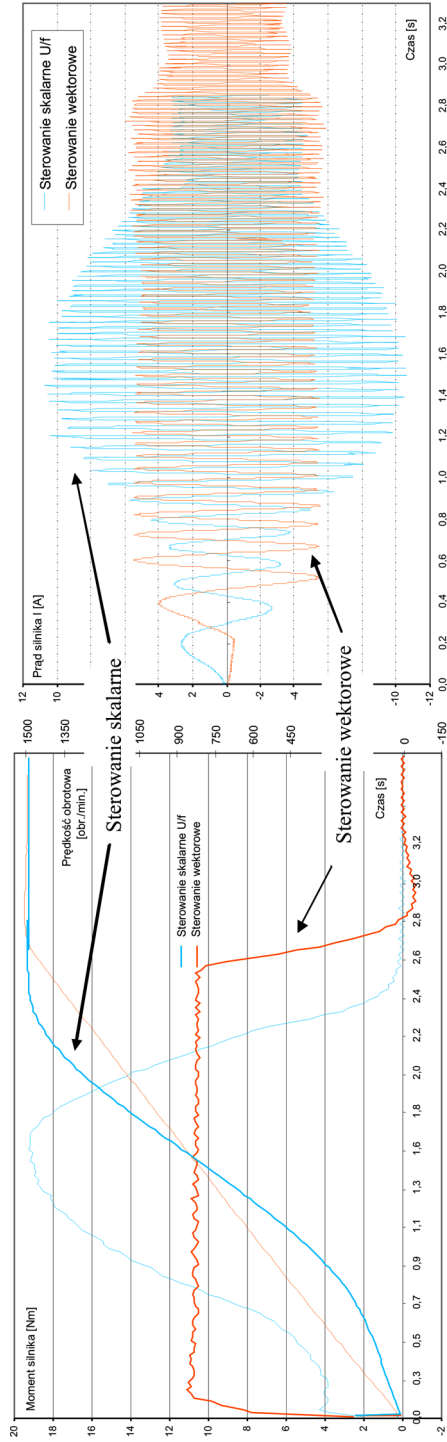
Współczesne rozwiązania sterowania układami przekształtnikowymi obejmują całą strukturę procesu, począwszy od warstwy realizacji automatycznego sterowania dla pojedynczych maszyn i urządzeń, aż do systemów nadrzędnego sterowania, monitorowania i zarządzania całością procesu wydobywczego. W przypadku napędów przemysłowych ciągła zmiana ich stanu pracy (rozruchy, hamowania, zmiana obciążenia i wartości zadanej, zmiana warunków otoczenia i temperatury) jest elementem nieodłącznym. Bardzo ważnym elementem, który ma tutaj decydujący wpływ na dynamikę całego układu jest kształt krzywej regulacji prądu w pierwszych chwilach po załączeniu napędu. Z tego względu należy zwracać uwagę na uzasadniony fizyczną stroną procesu poprawny dobór nastaw parametrów funkcyjnych napędów oraz weryfikację parametrów otrzymanych z identyfikacji schematu zastępczego silnika, który funkcjonuje w algorytmie sterowania falownika i ma dotyczyć rzeczywistego obiektu. Przed uruchamianiem procedur testowych i identyfikacji należy dokładnie rozpoznać układ napędowy (specyfikę aplikacji, typ przekształtnika, dane silnika, mechanikę obciążenia, wpływ temperatury, rodzaj podłoża, itd.). Do algorytmu sterowania należy wprowadzić dane znamionowe przekształtnika i silnika, a następnie należy wykonać podstawową parametryzację i identyfikację, tworząc przy tym uproszczony model zastępczy silnika i systemu elektromechanicznego [3].

Już sam silnik indukcyjny jest obiektem nieliniowym i wielowymiarowym z występującymi w nim sprzężeniami sygnałów sterujących z wewnętrznymi sygnałami regulowanymi, takimi jak strumienie skojarzone czy moment elektromagnetyczny. Jego sterowanie, polegające na oddziaływaniu na wzajemne położenie wektorów przestrzennych w wirującym układzie współrzędnych, określa się terminem sterowania wektorowego lub polowozorientowanego (rys. 5) [5].

Ten rodzaj sterowania jest obecnie standardem w dziedzinie napędów o regulowanej prędkości obrotowej z silnikami indukcyjnymi. Charakteryzuje się on szybką reakcją obiektu sterowanego na zmianę wartości zadanej (pomimo opóźnień zjawisk i procesów elektromagnetycznych zachodzących w stanach rozruchowych). Posiada niższe wartości prądów i momentów rozruchowych w porównaniu do algorytmów skalarnych (rys. 6).



**Rys. 5.** Schemat funkcjonowania wektorowego algorytmu sterowania napędem SIMOVERT produkcji Siemens — badania własne SIMLOGIC



**Rys. 6.** Porównanie przebiegów rozruchowych przykładowego silnika indukcyjnego o mocy 1,5 kW dla różnych algorytmów sterowania [5]



### **3. Dobór układów napędowych i sterowania przy projektowaniu algorytmów**

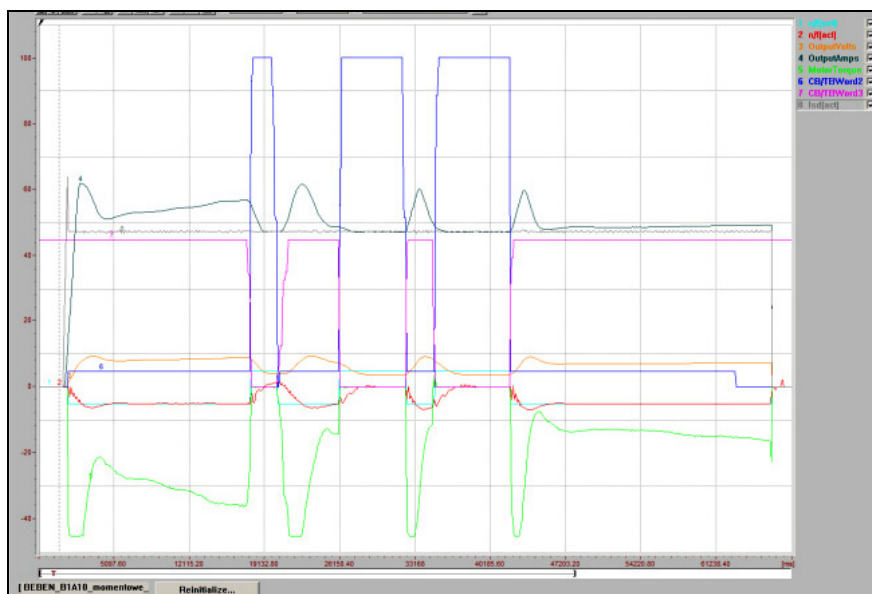
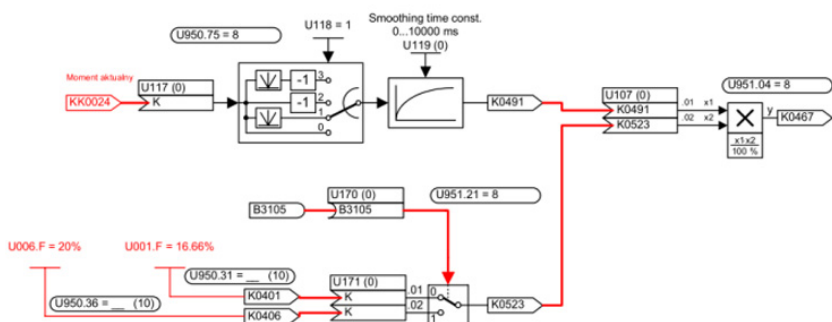
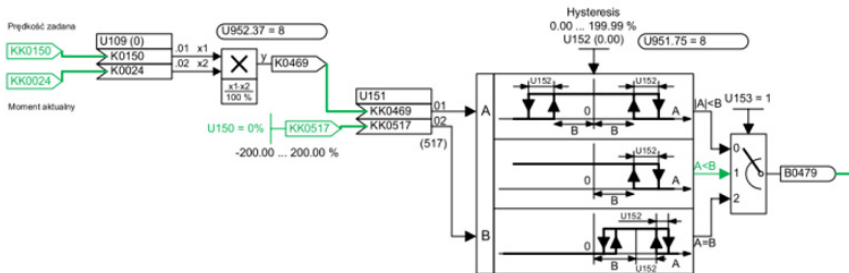
Służby utrzymania ruchu nie mają możliwości oceny poprawności danego rozwiązania bez należytego schematu, właściwego opisu algorytmu i sposobu jego realizacji. Projektanci oraz wykonawcy dostarczają dokumentację algorytmów pracy maszyny górniczej w formie opisowej (dotyczy reakcji na sygnały i sekwencji sterowania), a nie w formie schematu graficznego zaimplementowanego rozwiązania. Aby móc właściwie oceniać, co zostało zaimplementowane i w jaki sposób, każdorazowo powinno wykonywać się szczegółowy raport z prac uruchomieniowych z rozrysowanym mechanizmem wymiany danych technologicznych i komunikacji. Takie elementy powinien posiadać także projekt automatyki i systemu sterowania, [2–4]. Powinno się zakładać etap korekty wprowadzonych nastaw, już po odbiorze prac i po przepracowaniu zdefiniowanego czasu (kilka miesięcy) lub wypracowaniu określonych norm wydajności urządzeń. Maszyny górnicze są obecnie programowane na wartość zadaną i ograniczenia prądu oraz momentu falowników, a nie na ograniczenia pochodzące od drgań konstrukcji i oscylacji regulacji techniki napędowej. Programista wysyła wartości zadane po sieci komunikacyjnej, a pozostałe zadania falowniki wykonują samodzielnie. Zmusza to do opracowywania własnych, nierzadko zawierających usterki, algorytmów sterowania w zakresie techniki napędowej, często bez możliwości weryfikacji (brak analizy i obliczeń wstępnych, symulacji i weryfikacji obiektowo-laboratoryjnej przed implementacją na obiekcie, brak realizacji na innych maszynach górniczych).

Przykład poprawnie działającego algorytmu zaprojektowanego przez firmę SIMLOGIC przedstawia rysunek 7.

Brak badań modelowych oraz weryfikacji na obiektach testowanych tworzy sytuację niebezpieczną, gdyż wykonywanie uruchamiania bezpośrednio na obiekcie maszyny górniczej, połączonego z eksperymentem nie pozwala na wcześniejszą znajomość granicy bezpieczeństwa obiektu (metody doborów nastaw regulacji — drgania regulatorów, ruchowa identyfikacja parametrów zastępczych uruchamianych silników, itd. Wszystkie te próby w zakresie modelowym i laboratoryjnym są dopuszczalne. Tymczasem testy te wykonuje się często blisko lub na granicy wytrzymałości mechanicznej konstrukcji. O tym jak ważne są te zagadnienia przekonują nas problemy z uzyskaniem zaprojektowanej zdolności ruchowej maszyny górniczej. Przykład: maszyna nie może wycofać się na czas lub zmienić położenia i zostaje w efekcie zniszczona — sytuacja niebezpieczna. Inny problem to rozruch maszyny zimą — dobrano silniki o zbyt małej mocy. Kolejny problem z pracą maszyny — wpada ona w drgania, które mogą doprowadzić do poważnych uszkodzeń mechanicznych i w efekcie do zaburzenia równowagi statycznej.

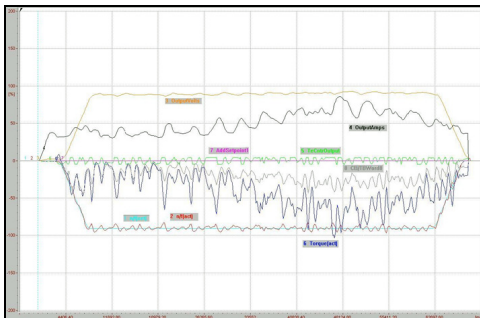
### **4. Uruchomienie, poprawna parametryzacja i dobór nastaw**

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 sygnały sterujące dla falowników.

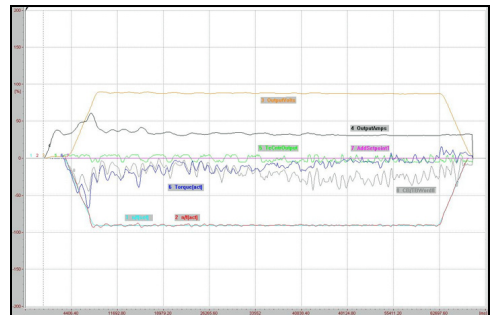


**Rys. 7.** Sterowanie momentowe bębna kablowego (samo-nawijanie) w zadaniach algorytmu roboczego maszyny górniczej (fragment programu jako przykład tworzenia algorytmu za pomocą oprogramowania Microsoft VISIO) — wykonanie SIMLOGIC

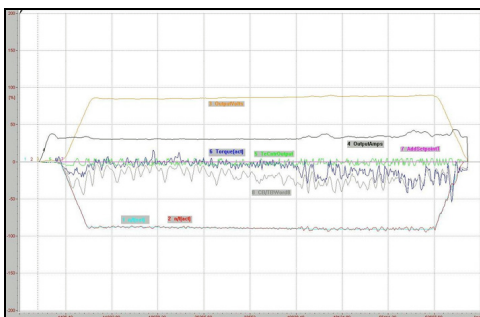
Dostępność struktur programistycznych w logice sterowania przemiennikami pozwala na poprawne wykonanie założeń technologicznych oraz daje możliwość wprowadzania korekt i poprawek pochodzących od regulowanych wielkości. Tylko właściwie opracowany algorytm umożliwi, np. sterowanie pojedynczymi gąsienicami napędów jazdy maszyny w zakresie przyjętych wytycznych algorytmu sterowania oraz redukcję drgań i poprawi rozkład naprężeń w elementach konstrukcyjnych (rys. 8) [1]. Przy uruchamianiu programów na obiekcie rzeczywistej maszyny górniczej, powinno się dysponować wstępnymi nastawami regulacji policzonymi lub zasymulowanymi na obiekcie modelowym. W przeciwnym przypadku powstanie luka spowodowana np. niedoszacowaniem obliczeń elektromechanicznych lub brakiem informacji o wzajemnych interakcjach zaprojektowanych algorytmów sterowania. Np. modernizując maszynę sterowaną napędami prądu stałego przy przejściu na technikę falownikową zwykle przelicza się tylko moment i prąd. Nie uwzględnia się natomiast sposobu reakcji tranzystorowych urządzeń falownikowych i negatywnego oddziaływania na elementy sprzęgów mechanicznych, na gąsienice, przekładnie oraz konstrukcję modernizowanej maszyny. W Polsce nie wykonuje się szczegółowych badań stanów dynamicznych takich maszyn, a jedynie weryfikację za pomocą obliczeń statycznych.



Gąsienica 1



Gąsienica 2



Gąsienica 3

Legenda:  
 Prędkość zadana,  
 Prędkość aktualna,  
 Napiecie silnika,  
 Prąd silnika,  
 Moment aktualny,  
 Moment średni

**Rys. 8.** Jazda zwałowarki, z zaimplementowanym autorskim algorytmem wyrównywania naprężeń pomiędzy gąsienicami G1, G2, G3 napędów jazdy zwałowarki [1]

## 5. Próby ruchowe i odbiory techniczne

Fakt, iż maszyny górnicze zostały odebrane i pracują, nie oznacza, że są właściwie sterowane. Urządzenia mechaniczne zmieniają bowiem swoje właściwości podczas pracy, a parametry obiektów regulacji także się wówczas zmieniają. Osadzanie się błota i lodu na elementach mechanicznych oraz zmiany właściwości smarnych i lepkości płynów eksploatacyjnych mogą powodować przeciążenia zarówno konstrukcji, jak również błędy od ograniczeń momentowo-prądowych.

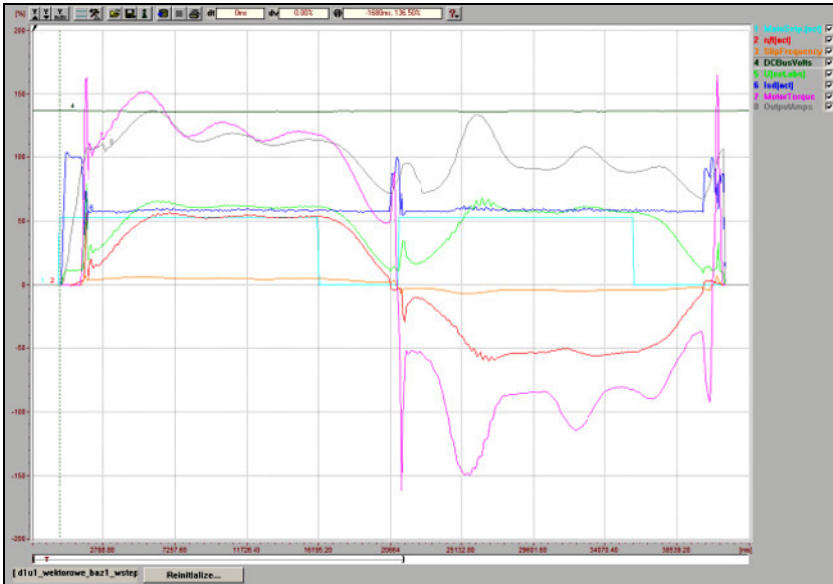
Brak jest w tym zakresie wyników badań, na ile zwiększają się wówczas momenty oporów ruchu, a mogą to być krotności znaczne, które są często niedoszacowane przez projektantów.

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 za pomocą sieci przemysłowych. Czasy eksploatacji silników indukcyjnych pierścieniowych i silników prądu stałego sterowanych z przekształtników analogowych miały zupełnie inne kryteria doboru napędów.

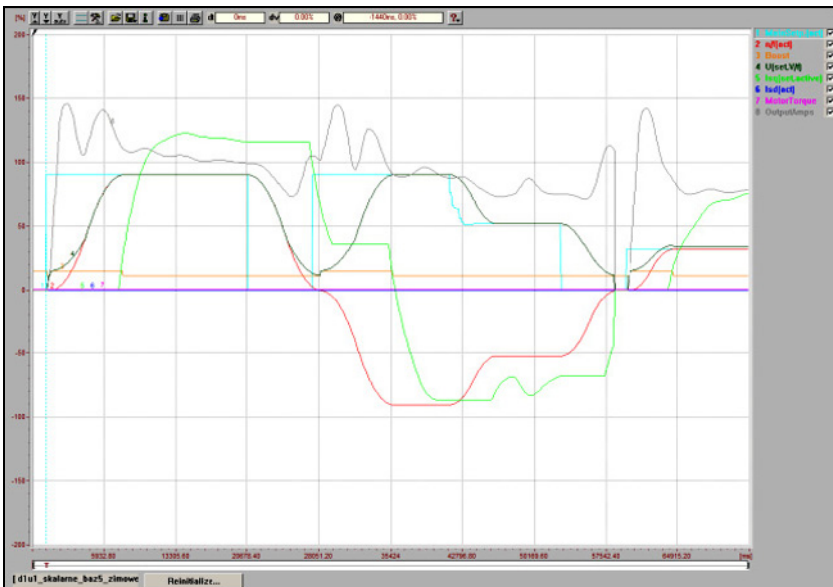
Aktualnie napędy bardzo często są niedoszacowane pod względem mocy i to nie tylko z uwagi na cenę zaproponowanego rozwiązania. Wynika to również z tworzenia maszyn unikatowych, w których pozorna oszczędność początkowa może powodować znaczne straty w trakcie eksploatacji maszyny — dobrze zaprojektowanej, tanio uruchomionej i zarazem niedoposażonej.

Zdaniem autorów, powinno się opracować właściwe standardy i skorygować istniejące procedury doboru i odbioru napędów falownikowych 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. Przykład źle dobranych napędów obrotu przenośnika przy krytycznych warunkach pogodowych i osadzeniu się zmarzlin na elementach mechanicznych zaprezentowano na rysunku 9.

Maszyna przed zmianami algorytmu posiadała problem z rozruchem i poprawną pracą. Jako środek zaradczy, wprowadzono metodę sterowania grupowego skalarnego — zmiany zadziały pozytywnie. Maszyna przenośnika samojezdnego aktualnie posiada dużo większe zdolności manewrowe dla wysięgnika odbierającego i nie ma problemów z drganiami, które wyłączały falownik 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.



Zimowe warunki pogodowe – problem z obrotem maszyny przenośnika



Wprowadzenie modyfikacji, poprawa — jednak dobrano za małe napędy na takie warunki pogodowe

**Rys. 9.** Niedośzacowanie napędów falownikowych i definicja niewłaściwego algorytmu sterowania napędami grupowymi, jako przyczyna drgań oraz problemów z rozruchem przenośnika w sezonie zimowym — badania własne

## 6. Uwagi końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań i zgromadzonych doświadczeń autorzy sugerują:

- 1) Opracowanie dla eksploatowanych maszyn górniczych wytycznych umożliwiających adaptację nastaw uwzględniających pory roku i zmiany parametrów podłoża oraz parametrów zastępczych silników napędowych.
- 2) Przeprowadzanie okresowych przeglądów wszystkich lub wybranych przez kopalnie maszyn, które były uruchomiane w oparciu o falownikową technikę napędową. Do każdej maszyny pracującej w sieci komunikacyjnej można instalować dodatkowe urządzenia rejestrujące, które będą pełnić rolę akwizytora danych lub można dołączać dodatkowy komputer z właściwym oprogramowaniem (także urządzenie HMI) pozwalające na wykonywanie rejestracji roboczych i na tej podstawie wnioskować co do środków zaradczych i prewencyjnych.
- 3) Długie opóźnienia w pętach sprzężenia zwrotnego mogą powodować chwilowe utraty stabilności układów sterowania maszyn górniczych. Aby temu przeciwdziałać proponuje się bieżące obliczanie parametrów zastępczych silników w różnych temperaturach i na tej podstawie proponowanie funkcji adaptacji zmian rezystancji zastępczej uzwojenia wirnika, którą można następnie implementować w nastawach.

### LITERATURA

- [1] *Anuszczyk J., Jabłoński M.*: Modyfikacja bezczujnikowego algorytmu sterowania napędami gąsienic jazdy zwałowarki ZGOT. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 112, Seria: Konferencje Nr 44, ss. 69–76. Materiały IV Międzynarodowego Kongresu: Górnictwo Węgla Brunatnego — „Węgiel Brunatny, Energetyka i Środowisko”, Bełchatów, 6–8 czerwca 2005, Wrocław 2005
- [2] *Anuszczyk J., Jabłoński M.*: Określanie wartości momentu statycznego dla stanu nieruchomego wału silnika indukcyjnego w przekształtnikowym układzie napędowym dźwigu. Zeszyty Problemowe BOBRME-KOMEL, Maszyny Elektryczne, nr 75, 2006, ss.125-131. Materiały XV Seminarium Technicznego nt. „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych” — PEMINE’2006
- [3] *Anuszczyk J., Jabłoński M.*: Representation of an induction motor in field-oriented steering algorithm for industrial converter drive systems. Selected papers from the 15th Symposium on Micromachines and Servosystems — MiS’2006. Proceedings of Electrotechnical Institute. No 229, pp.127–139, Warsaw 2006
- [4] *Anuszczyk J., Jabłoński M.*: Badania elektromechanicznych zespołów napędowych zwałowarki ZGOT. Górnictwo i Geoinżynieria. Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej. Rok 33, Zeszyt nr 2, ss. 43–52. Materiały VI Międzynarodowego Kongresu Górnictwa Węgla Brunatnego, Bełchatów, 18–20 maja 2009 Kraków 2009
- [5] *Jabłoński M.*: Analiza parametrów funkcyjnych oraz modyfikacja algorytmów sterowania połowo-zorientowanego napędu falownikowego z silnikiem indukcyjnym. Rozprawa doktorska, Wydział WEIIA PŁ, Łódź 2006
- [6] *Jabłoński M., Graszewicz P.*: Zastosowanie sieci PROFIBUS do badań i diagnostyki układów napędowych, Technika Zagraniczna, 2007