

doi:10.15199/48.2017.07.16

## Synteza układu regulacji mocy biernej silnika synchronicznego z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono propozycję struktury układu regulacji mocy biernej silnika synchronicznego z elementem przełączającym sygnał błędny minimalny. Zaprezentowano implementację struktury układu regulacji w modelu symulacyjnym programu Matlab-Simulink. Zamieszczono przykładowe wyniki badań symulacyjnych. Przedstawiono efekty działania w układzie rzeczywistym silnika synchronicznego z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia z zaproponowaną strukturą układu regulacji.

**Abstract.** The paper presents a proposal of the structure of the reactive power control system for synchronous motor with minimum error signal switching element. Implementation of the control system structure in the Matlab-Simulink simulation model was presented. Selected results of the simulation tests was provided. Operational effects of the real synchronous motor with the microprocessor-controlled excitation unit with the proposed control system structure was presented too. (**Synthesis of the reactive power control system for synchronous motor with microprocessor controlled excitation unit**)

**Słowa kluczowe:** silnik synchroniczny, sterowanie mikroprocesorowe, regulator mocy biernej

**Keywords:** synchronous motor, microprocessor control, reactive power regulator

### Wstęp

Jednym z podstawowych źródeł mocy biernej w zakładach przemysłowych są silniki synchroniczne. W wielu przypadkach napędy te pracują w sposób ciągły i nie są wyłączane nawet w dni wolne od pracy (napędy wentylatorów w kopalniach, sprężarki, pompy itp.). W wielu napędach silniki synchroniczne pracują z momentem obciążenia znacznie mniejszym od znamionowego. Np. w kopalniach regułą jest, że napędy wentylatorów obciążone są w granicach 40-60 %, a napędy sprężarek i maszyn wyciągowych w granicach 60-80 % mocy znamionowej. Pozwala to na wykorzystanie ich jako kompensatorów w układach automatycznej kompensacji mocy biernej w szerokim zakresie zmian generowanej mocy [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Poprzez kompensację mocy biernej z wykorzystaniem silników synchronicznych rozumie się kompensację mocy biernej podstawowej harmonicznej prądu i napięcia.

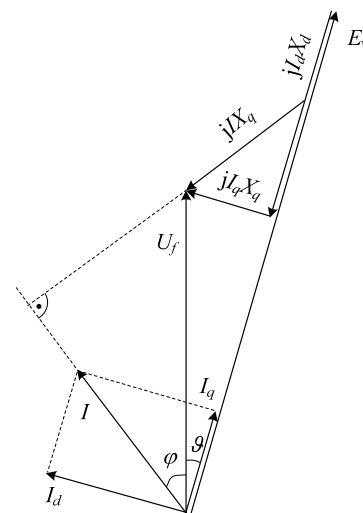
Dla silnika synchronicznego realizującego funkcje napędowe, a jednocześnie wykorzystywanego jako kompensator mocy biernej, można określić trzy podstawowe cele sterowania, jakie powinny być osiągnięte w wyniku zastosowania układu regulacyjnego:

- uzyskanie wymaganych przebiegów przejściowych niektórych mechanicznych lub elektrycznych zmiennych stanu maszyny w celu ograniczenia wpływu dynamiki silnika na sieć elektroenergetyczną i napędzaną maszynę,
- zapewnienie stabilnej pracy silnika z prędkością synchroniczną,
- wytworzenie w silniku mocy biernej odpowiadającej z założoną dokładnością wartości zadanej.

W wielu przypadkach, na poziomie indywidualnej regulacji prądu wzbudzenia silnika, przedstawione cele mogą być wzajemnie sprzeczne. W takim przypadku funkcja napędowa powinna dominować nad wykorzystaniem silnika jako regulowanego źródła mocy biernej. Konieczne jest więc zastosowanie odpowiednich układów regulacji uwzględniającej wszystkie przedstawione kryteria z właściwym priorytetem.

### Moc bierna silnika synchronicznego

Na rysunku 1 przedstawiono wykres wskazowy silnika synchronicznego z biegunami jawnymi w układzie współrzędnych  $dq$  przy pominięciu strat w uzwojeniu stojana [1].



Rys.1. Wykres wskazowy silnika synchronicznego z biegunami jawnymi

Na podstawie wykresu wskazowego z rysunku 1 można zapisać [1, 2]

$$(1) \quad P = \frac{mU_f E_w}{X_d} \sin \theta + \frac{mU_f^2}{2} \sin 2\theta \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

$$(2) \quad Q = -\frac{mU_f^2}{X_q} + \frac{mU_f E_w}{X_d} \cos \theta + mU_f^2 \cos^2 \theta \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

gdzie:  $P$  – moc czynna,  $Q$  – moc bierna,  $m$  – liczba faz,  $U_f$  – napięcie fazowe,  $E_w$  – siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika,  $I_w$  – prąd wzbudzenia  $X_d$  – reaktancja synchroniczna w osi  $d$  (reaktancja podłużna),  $X_q$  – reaktancja synchroniczna w osi  $q$  (reaktancja poprzeczna),  $\theta$  – kąt mocy.

Przy założeniu liniowości charakterystyki magnesowania siła elektromotoryczna może być wyrażona zależnością

$$(3) \quad E_w = \frac{I_w}{k_w},$$

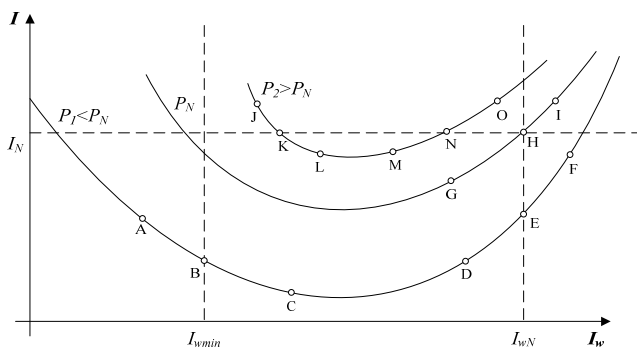
gdzie  $k_w$  – stała konstrukcyjna silnika.

Zgodnie z (1), (2) oraz (3) przy stałym obciążeniu silnika mocą czynną zmiana prądu wzbudzenia prowadzi do zmiany kąta mocy oraz mocy biernej pobieranej przez silnik.

### Obszar pracy silnika w stanie synchronicznym

Ograniczenie zakresu regulacji mocy biernej silnika synchronicznego wynika z warunku utrzymania silnika w stanie pracy synchronicznej, co zdeterminowane jest maksymalną dopuszczalną wartością kąta mocy w stanach ustalonych i nieustalonych. Wymaga to ograniczenia minimalnej wartości prądu wzbudzenia silnika przy określonym maksymalnym obciążeniu mocą czynną. Jednocześnie należy uwzględnić ograniczenia wynikające z wartości znamionowych prądu stojana oraz prądu wzbudzenia [1, 2, 4]. Minimalna oraz znamionowa wartość prądu wzbudzenia przy ustalonym obciążeniu mocą czynną determinują minimalną i maksymalną wartość mocy biernej, jaką może wygenerować silnik synchroniczny.

Jedną z charakterystyk opisujących pracę maszyny synchronicznej w stanie ustalonym są krzywe Mordey'a (krzywe V) [1, 4]. Przykładowy przebieg krzywych V przedstawiono na rysunku 2. Zaznaczono dopuszczalny obszar pracy silnika ograniczony znamionowymi wartościami prądu stojana i prądu wzbudzenia oraz minimalną wartością prądu wzbudzenia zapewniającą stabilną pracę w stanie synchronicznym dla założonego maksymalnego obciążenia mocą czynną.



Rys.2. Krzywe Mordey'a silnika synchronicznego

Regulacja mocy biernej odbywa się na podstawie sygnału błędu pomiędzy wartością zadaną, a wartością rzeczywistą mocy biernej zgodnie z zależnością:

$$(4) \quad \varepsilon(Q) = Q_z - Q,$$

gdzie:  $\varepsilon(Q)$  – błąd mocy biernej,  $Q_z$  – wartość zadana mocy biernej,  $Q$  – wartość mierzona mocy biernej.

Ograniczenie dopuszczalnego obszaru pracy silnika pozwala wyznaczyć dodatkowe błędy:

$$(5) \quad \varepsilon(I_{wN}) = I_{wN} - I_w,$$

gdzie  $\varepsilon(I_{wN})$  – błąd od wartości znamionowej prądu wzbudzenia,  $I_{wN}$  – wartość znamionowa prądu wzbudzenia,  $I_w$  – wartość mierzona prąd wzbudzenia,

$$(6) \quad \varepsilon(I_{wmin}) = I_{wmin} - I_w,$$

gdzie  $\varepsilon(I_{wmin})$  – błąd od wartości minimalnej prądu wzbudzenia,  $I_{wmin}$  – wartość minimalna prądu wzbudzenia,

$$(7) \quad \varepsilon(I_N) = I_N - I,$$

gdzie  $\varepsilon(I_N)$  – błąd od wartości znamionowej prądu stojana,  $I_N$  – wartość znamionowa prądu stojana,  $I$  – wartość mierzona prąd stojana.

Rozpatrując wykres krzywych Moredey'a przedstawionych na rysunku 2 można przeprowadzić analizę kilku przypadków:

- dla przypadku, gdy punkt pracy znajduje się w punkcie C, a nowy punkt pracy wynikający z wartości zadanej mocy biernej powinien znaleźć się w punkcie D oraz dla przypadku, gdy punkt pracy znajduje się w punkcie D, a nowy punkt pracy wynikający z wartości zadanej mocy biernej powinien znaleźć się w punkcie C regulacja

powinna odbywać się na podstawie sygnału błędu mocy biernej wyznaczonego wg zależności (4);

- dla przypadku, gdy punkt pracy znajduje się w punkcie D, a nowy punkt pracy wynikający z wartości zadanej mocy biernej powinien znaleźć się w punkcie F prąd wzbudzenia powinien zostać ograniczony do wartości znamionowej, a rzeczywisty punkt pracy powinien znaleźć się w punkcie E, regulacja powinna odbywać się na podstawie sygnału błędu prądu wzbudzenia wyznaczonego wg zależności (5);
- dla przypadku, gdy punkt pracy znajduje się w punkcie C, a nowy punkt pracy wynikający z wartości zadanej mocy biernej powinien znaleźć się w punkcie A prąd wzbudzenia powinien zostać ograniczony do wartości minimalnej, a rzeczywisty punkt pracy powinien znaleźć się w punkcie B, regulacja powinna odbywać się na podstawie sygnału błędu prądu wzbudzenia wyznaczonego wg zależności (6);
- dla przypadku, gdy punkt pracy znajduje się w punkcie G, a nowy punkt pracy wynikający z wartości zadanej mocy biernej powinien znaleźć się w punkcie I zarówno prąd wzbudzenia jak i prąd stojana powinny zostać ograniczone do wartości znamionowych, a rzeczywisty punkt pracy powinien znaleźć się w punkcie H będącym znamionowym punktem pracy silnika, regulacja powinna odbywać się na podstawie sygnałów błędów wyznaczonych wg zależności (5) i (7);
- dla przypadku, gdy punkt pracy znajduje się w punkcie M, a nowy punkt pracy wynikający z wartości zadanej mocy biernej powinien znaleźć się w punkcie O prąd wzbudzenia powinien zostać ograniczony do takiej wartości aby prąd stojana został ograniczony do wartości znamionowej, a rzeczywisty punkt pracy powinien znaleźć się w punkcie N, regulacja powinna odbywać się na podstawie sygnału błędu prądu stojana wyznaczonego wg zależności (7);
- dla przypadku, gdy punkt pracy znajduje się w punkcie L, a nowy punkt pracy wynikający z wartości zadanej mocy biernej powinien znaleźć się w punkcie J prąd wzbudzenia powinien zostać ograniczony do takiej wartości aby prąd stojana został ograniczony do wartości znamionowej, a rzeczywisty punkt pracy powinien znaleźć się w punkcie K, regulacja powinna odbywać się na podstawie sygnału błędu mocy biernej oraz błędu prądu stojana wyznaczonego wg zależności (7) przy czym oddziaływanie sygnału błędu powinno być przeciwne niż przy dochodzeniu do punktu pracy N.

Zakładając, że dla pracy silnikowej maszyny synchronicznej moc bierna pobierana (moc bierna indukcyjna) oznaczana jest znakiem dodatnim, a moc bierna oddawana do sieci (moc bierna pojemnościowa) oznaczana jest znakiem ujemnym, zwiększenie mocy biernej pojemnościowej odbywa się poprzez zwiększenie prądu wzbudzenia i zachodzi przy ujemnym znaku sygnału błędu podawanego na wejście regulatora. Należy więc uwzględnić odpowiednie znaki sygnałów błędów wyznaczonych z zależności (4-7) w zależności od aktualnego i zadanego stanu pracy silnika.

Korekta napięcia wzbudzenia wynikającego z sygnału błędu mocy biernej po osiągnięciu ograniczeń prądowych, ze względu na dużą stałą czasową obwodu wzbudzenia, powoduje przeregulowania prądów poza wartości ograniczeń.

Przyjmując że w układzie regulacji nie jest dostępne obliczeniowe wyznaczanie dowolnych punktów pracy na podstawie charakterystyk statycznych silnika rozwiązaniem jest taki układ regulacji, który skoryguje napięcie wzbudzenia odpowiednio wcześniej w miarę zbliżania się punktu pracy do ograniczenia.

Powyższe rozważania dotyczą stanu normalnej pracy synchronicznej. W szczególnych przypadkach, np. podczas forsowania prądu wzbudzenia spowodowanego spadkiem napięcia zasilającego, dopuszcza się krótkotrwałe, kilkusekundowe przekroczenie ograniczeń związanych z wartościami znamionowymi prądów stojana i wzbudzenia [7].

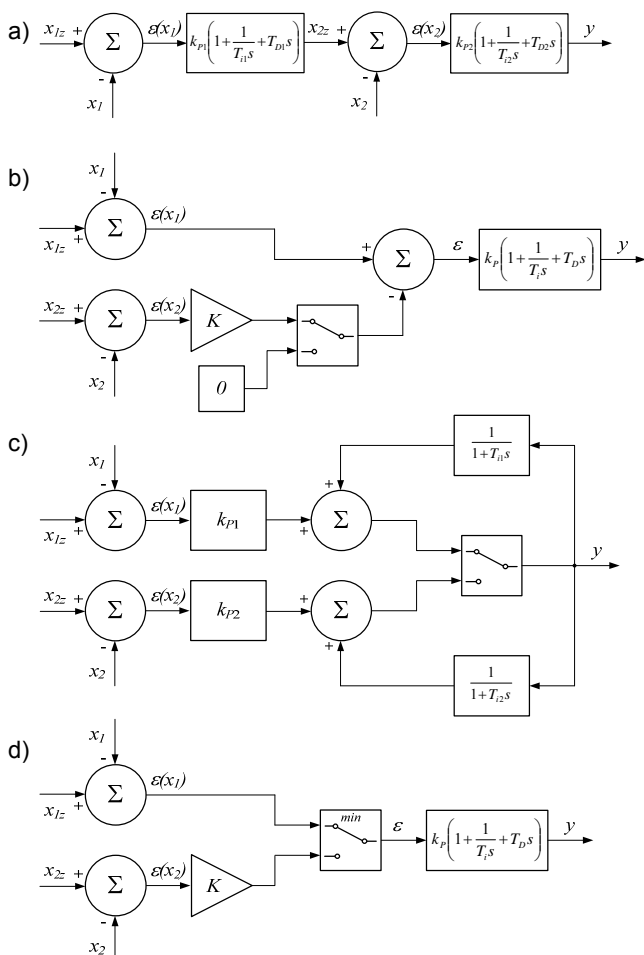
### Struktura układ regulacji

Układ regulacji powinien spełniać warunek

$$(8) \quad |\varepsilon(t)| \leq \varepsilon_{dop} \text{ dla } t \leq t_{dop},$$

gdzie:  $\varepsilon(t)$  – błąd regulacji,  $\varepsilon_{dop}$  – dopuszczalny błąd regulacji,  $t_{dop}$  – dopuszczalny czas uzyskania stanu ustalonego.

Spełnienie warunku (8) można uzyskać stosując regulatory typu P, I, D oraz ich połączenia, np. regulatory PI, PID itp. Dla układów regulacji które powinny uwzględniać więcej niż jedną wartość regulowaną stosuje się różne struktury układów regulacji [3, 8, 9]. W takim przypadku dopuszcza się występowanie błędów regulacji wielkości podstawowej w czasie dłuższym od dopuszczalnego przy jednoczesnym spełnieniu zależności (8) dla wielkości podlegającej ograniczeniu. Przykładowe struktury układów regulacji dla dwóch wielkości regulowanych przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Przykładowe struktury układów regulacji: a) kaskadowa, b) ze sterowanym członem korygującym, c) selekcyjny ze sprzężeniami całkującymi, d) selekcyjny minimalnego błędu regulacji

Na rysunku 3a) przedstawiono typowy układ regulacji o strukturze kaskadowej, gdzie błąd wielkości regulowanej podawany jest na wejście regulatora nadrzędnego. Sygnał

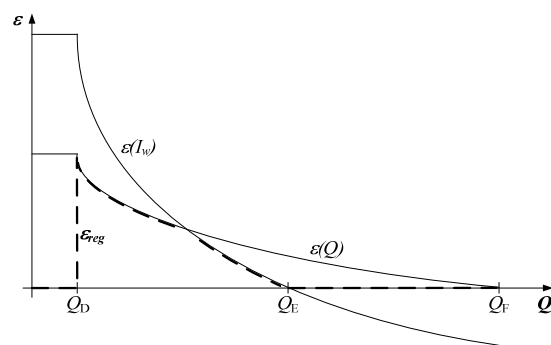
wielkości ograniczanej podawany jest na wejście regulatora podrzędnego.

W układach gdzie regulacji podlega jedna wielkość, a inna wielkość jest ograniczeniem działającym jedynie w szczególnych przypadkach stosuje się przełączane układy regulacji.

Na rysunku 3b) przedstawiono układ regulacji z członem korygującym sterowanym przez układ logiczny. W normalnym stanie pracy człon korygujący nie ma wpływu na wartość regulowaną. W przypadku aktywacji ograniczenia sygnał członu korygującego z odpowiednią wagą oddziałuje na błąd wielkości regulowanej.

Na rysunku 3c) przedstawiono układ selekcyjny z regulatorem wielkości podstawowej i regulatorem wielkości dodatkowej. W normalnym stanie pracy układ logiczny wybiera regulator wielkości podstawowej. Jeśli zmienna sterowana niewybranego regulatora zbliża się do wartości zadanej, to jego wyjście zbliża się do wartości sygnału wyjściowego regulatora wybranego. Po zrównaniu osiągnąony jest punkt przełączenia. Dalsze przekroczenie ograniczenia powoduje płynną zamianę ról obu regulatorów.

Do realizacji regulacji mocy biernej silnika synchronicznego z możliwością uwzględnienia dodatkowych ograniczeń zaproponowane strukturę układu regulacji przedstawioną na rysunku 3d). Działanie układu opera się o przełączanie minimalnego błędu przez układ logiczny. Wraz ze zbliżaniem się wartości wielkości ograniczanej do ograniczenia zmniejsza się błąd związany z ograniczeniem. Po zmniejszeniu błędu od ograniczenia, z uwzględnieniem odpowiedniej wagi, poniżej błędu od wartości regulowanej układ logiczny przełącza sygnał błędu podawany na wejście regulatora. Na rysunku 4 przedstawiono ideę działania procedury przełączania błędu regulacji. Oznaczono wartości mocy biernej odpowiadające punktom pracy D, E, F z rysunku 2.



Rys.4. Ilustracja działania procedury przełączania błędu regulacji:  $\varepsilon(Q)$  – błąd mocy biernej,  $\varepsilon(I_w)$  – błąd związany z ograniczeniem od znamionowej wartości prądu wzbudzenia,  $\varepsilon_{reg}$  – błąd wejściowy regulatora

Przedstawiona struktura z zastosowaniem układu logicznego przełączającego sygnały błędów regulacji pozwala na uwzględnienie dowolnych ograniczeń działających selektywnie w zależności od stanu obiektu regulowanego. Układ logiczny może kontrolować dowolną ilość sygnałów. Prawidłowe działanie układu wymaga dobrania odpowiednich wag poszczególnych sygnałów błędów.

### Badania symulacyjne

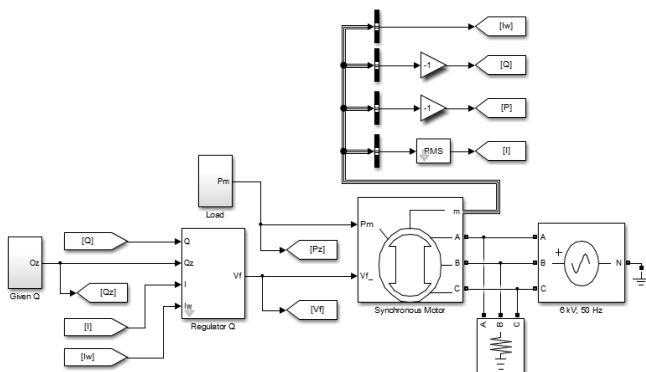
W celu weryfikacji koncepcji układu regulacji przeprowadzono badania symulacyjne w programie Matlab-Simulink. Jako obiekt badań wybrano silnik synchroniczny jawnobiegunowy typu GAe1716t/02 o danych znamionowych przedstawionych w Tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe silnika synchronicznego GAe1716t/01

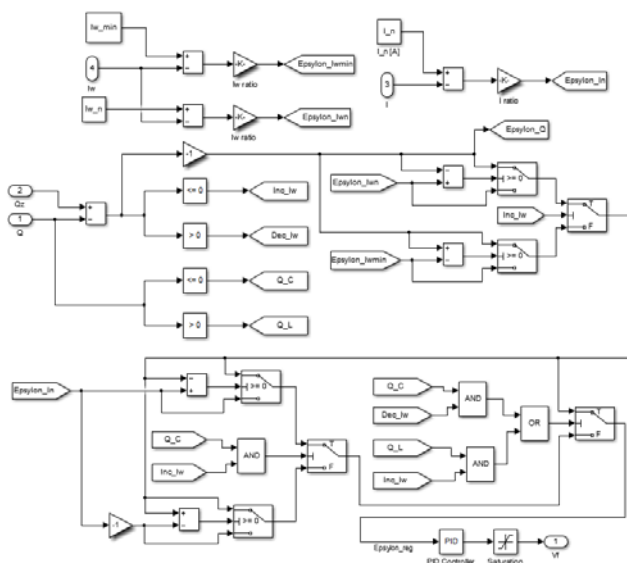
Parametr	Oznaczenie	Wartość
Moc mechaniczna	$P_{mN}$	3150 kW
Moc elektryczna	$P_N$	3274 kW
Napięcie stojana	$U_N$	6000 V
Prąd stojana	$I_N$	350 A
Napięcie wzbudzenia	$U_{wN}$	90 V
Prąd wzbudzenia	$I_{wN}$	313 A
Częstotliwość	$f_N$	50 Hz
Prędkość obrotowa	$n_N$	375 obr/min
Współczynnik mocy	$\cos\phi_N$	0,9 poj.

Na rysunku 5 przedstawiono model symulacyjny układu, a na rysunku 6 implementację układu regulacji. Maksymalną wartość napięcia w obwodzie wzbudzenia silnika ograniczono do wartości 108 V ( $1,2U_{wN}$ ). Ograniczenie związane z minimalną wartością prądu wzbudzenia przyjęto na poziomie 160 A ( $0,51I_{wN}$ ). Wartość ta została wyznaczona przy założeniu, aby kąt mocy nie przekroczył wartości znamionowej przy obciążeniu silnika mocą czynną  $P=0,6P_N$ . Zastosowano regulator typu PI.

W modelu symulacyjnym zaimplementowano działanie układu logicznego aktywującego odpowiednie ograniczenia w zależności od aktualnego i zadanego stanu pracy silnika, tj. zmianę kierunku oddziaływania ograniczenia związanego z prądem stojana w zależności od znaku aktualnej mocy biernej, aktywację i dezaktywację ograniczeń od minimalnego i znamionowego prądu wzbudzenia w zależności od kierunku zmian mocy biernej zadanej.



Rys.5. Model symulacyjny programu Matlab-Simulink

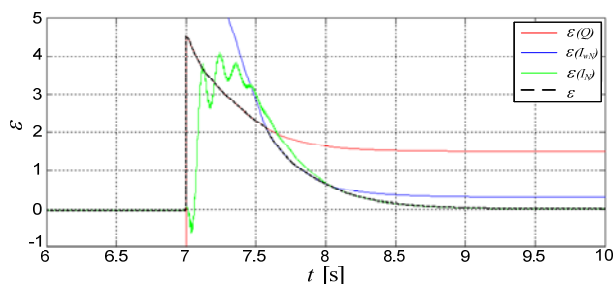


Rys.6. Implementacja układu regulacji w modelu symulacyjnym programu Matlab-Simulink

Na rysunkach 8a), 8b) i 8c) przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przy skokowych zmianach mocy biernej zadanej do wartości 3 MVar oraz -3 MVar odpowiadających punktom pracy silnika poza dopuszczalnym obszarem pracy dla obciążenia silnika mocą czynną znamionową, 60% mocy znamionowej oraz dla biegu jałowego. Zaznaczono dopuszczalne wartości prądów wzbudzenia i prądu stojana. Jak można zauważyć układ regulacji ograniczył rzeczywiste wartości mocy biernej silnika za względu na dopuszczalne wartości prądu stojana i prądu wzbudzenia.

Przykładowo, dla przebiegu z rysunku 8a) podczas pracy silnika z mocą bierną indukcyjną ograniczenie stanowi wartość znamionowego prądu stojana, a podczas pracy z mocą bierną pojemnościową maksymalna wartość prądu stojana oraz prądu wzbudzenia. Ustalony punkt pracy w tym przypadku jest punktem pracy w warunkach znamionowych.

Na rysunku 7 zamieszczono fragment przebiegu symulacyjnego przedstawiający działanie układu logicznego przy wyznaczaniu błędu wejściowego regulatora podczas zbliżaniu się do znamionowego punktu pracy silnika dla przypadku z rysunku 8a). Dla zadanej zmiany stanu silnika na błąd wejściowy regulatora mają wpływ 3 sygnały: błąd mocy, błąd od znamionowego prądu stojana oraz błąd od znamionowego prądu wzbudzenia. Można zauważyć proces przełączania sygnału błędu wejściowego regulatora w miarę zmian wartości rozpatrywanych sygnałów.



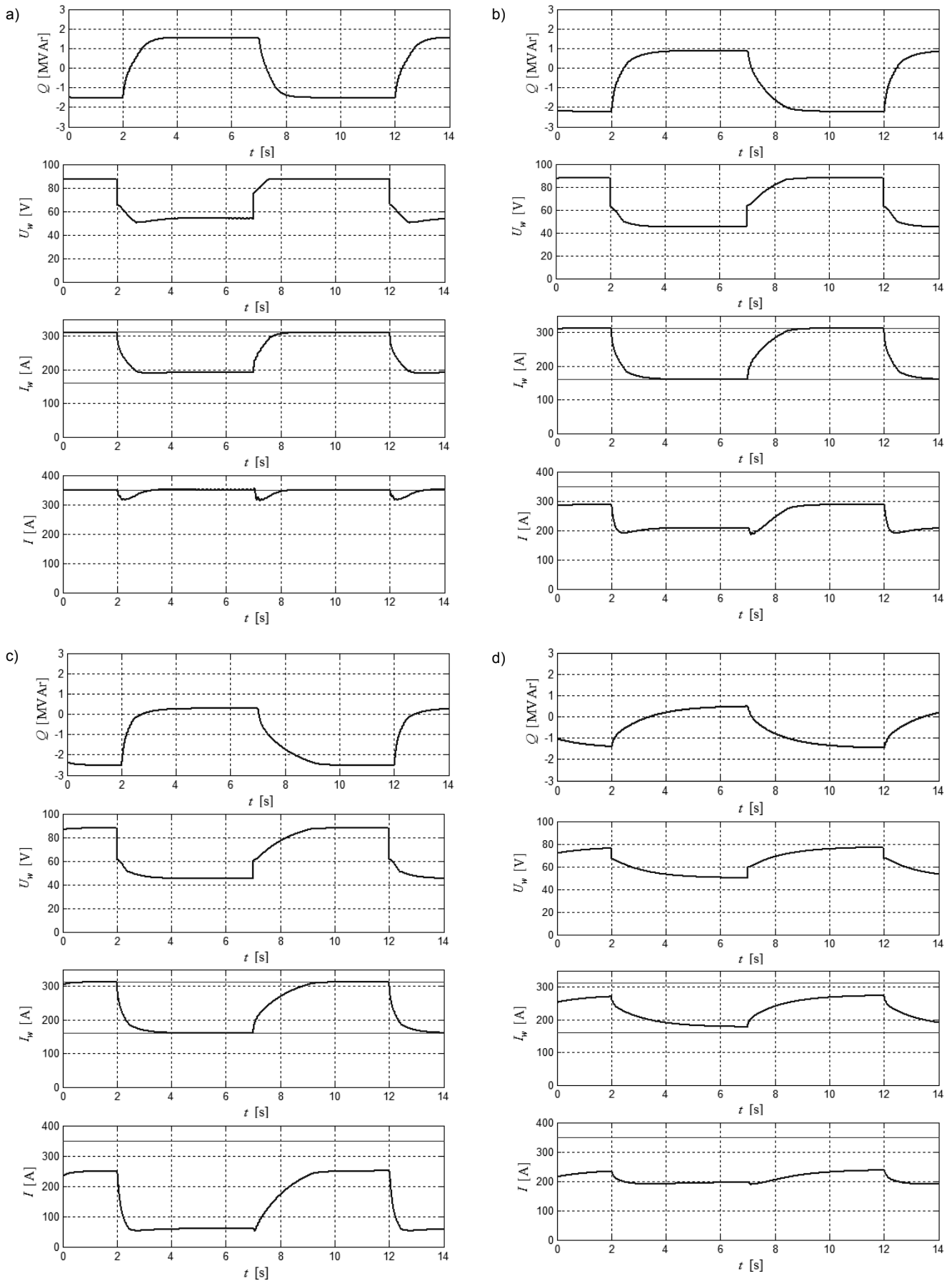
Rys.7. Przebieg symulacyjny wyznaczania błędu wejściowego regulatora przy obciążeniu silnika mocą  $P=P_N$  i skokowej zmianie mocy biernej zadanej do wartości  $Q_z=-3$  MVar w czasie  $t=7$  s:  $\varepsilon(Q)$  – błąd mocy biernej,  $\varepsilon(I_{wN})$  – błąd związany ze znamionową wartością prądu wzbudzenia,  $\varepsilon(I_N)$  – błąd związany ze znamionową wartością prądu stojana,  $\varepsilon$  – błąd wejściowy regulatora

Dodatkowe bloki w układzie regulacji powinny wpływać na działanie regulatora jedynie przy zbliżaniu się do ustalonych ograniczeń. Obszar ich oddziaływania zależy od doboru wag sygnałów błędów prądu stojana i wzbudzenia. Odpowiednio dobrane wagi nie ingerują w proces regulacji poza obszarami ograniczeń. Na rysunku 8d) przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przy obciążeniu silnika mocą czynną o wartości 60% mocy znamionowej i skokowych zmianach mocy biernej zadanej do wartości 0,5 MVar oraz -1,5 MVar. Obydwa docelowe punkty pracy znajdują się w dopuszczalnym obszarze pracy silnika.

Zaproponowana struktura układu regulacji nie wymaga czasochłonnych algorytmów obliczeniowych wyznaczających parametry docelowego punktu pracy oraz punktów pracy związanych z narzuconymi ograniczeniami przy aktualnym obciążeniu mocą czynną.

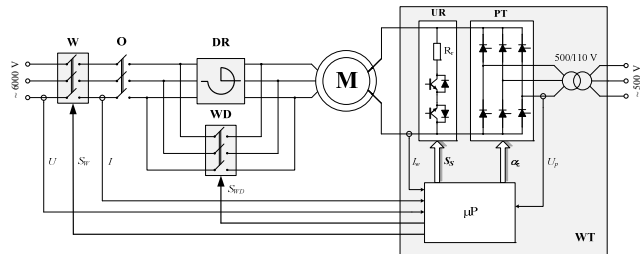
### Realizacja praktyczna

Działanie układu regulacji zweryfikowano na obiekcie rzeczywistym implementując odpowiednie procedury regulacyjne w oprogramowaniu systemu mikroprocesorowego bloku zasilania wzbudzenia silnika synchronicznego [10].



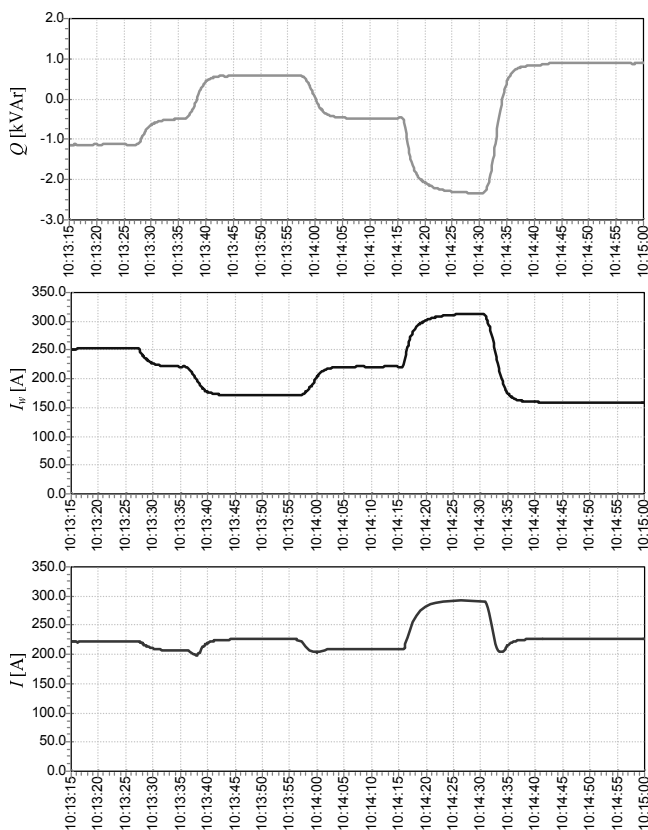
Rys.8. Wyniki badań symulacyjnych: a)  $P=P_N$  przy skokowych zmianach mocy biernej zadanej  $Q_{z1}=3$  MVar i  $Q_{z2}=-3$  MVar, b)  $P=0,6P_N$  przy skokowych zmianach mocy biernej zadanej  $Q_{z1}=3$  MVar i  $Q_{z2}=-3$  MVar, c)  $P=0,13P_N$  przy skokowych zmianach mocy biernej zadanej  $Q_{z1}=3$  MVar i  $Q_{z2}=-3$  MVar, d)  $P=0,6P_N$  przy skokowych zmianach mocy biernej zadanej  $Q_{z1}=0,5$  MVar i  $Q_{z2}=-1,5$  MVar;  $Q$  – moc bierna,  $U_w$  – napięcie wzbudzenia,  $I_w$  – prąd wzbudzenia,  $I$  – wartość skuteczna prądu stojana,  $\varepsilon$  – błąd wejściowy regulatora

Na rysunku 9 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania silnika z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia. Urządzenie zostało opracowane przy współudziale autora i jest przeznaczone do współpracy z silnikami o prądzie wzbudzenia do 400 A [10]. System mikroprocesorowy realizuje procedury rozruchu, regulacji mocy biernej lub prądu wzbudzenia w trakcie pracy synchronicznej oraz wyłączenia silnika z rozładaniem energii obwodu wzbudzenia [11, 12].



Rys.9. Schemat układu sterowania silnika: M – silnik synchroniczny, WT – blok zasilania wzbudzenia, μP – system mikroprocesorowy, PT – prostownik tyrystorowy, UR – układ rozruchowy, DR – dławik rozruchowy, W – wyłącznik, O – odłącznik, WD – wyłącznik dławika

Regulacja mocy biernej możliwa jest podczas pracy synchronicznej silnika. Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi pomiarowe zarejestrowane przez oprogramowanie diagnostyczno-serwisowe mikroprocesorowo sterowanego bloku zasilania wzbudzenia dla zmian wartości zadanej mocy biernej przy obciążeniu silnika mocą czynną 1,9 MW. Przeprowadzone pomiary potwierdzają prawidłowość działania zaproponowanej struktury układu regulacji i skuteczność ograniczenia obszaru pracy silnika w założonym zakresie niezależnie od zadanej wartości mocy biernej.



Rys.10. Przebiegi pomiarowe w układzie rzeczywistym:  $Q$  – moc bierna,  $I_w$  – prąd wzbudzenia,  $I$  – prąd stojana

## Podsumowanie i wnioski

Silnik synchroniczny traktowany jako regulowane źródło mocy biernej jest obiektem nieliniowym i niestacjonarnym. Sterowanie kątem opóźnienia załączenia mostka tyrystorowego zasilającego uzwojenie wzbudzenia wprowadza dodatkową nieliniowość. Wyznaczenie kąta opóźnienia załączenia tyrystorów dla dopuszczalnego punktu pracy silnika przy aktualnym obciążeniu mocą czynną na podstawie charakterystyk statycznych silnika wiązało by się z koniecznością realizacji czasochłonnych algorytmów obliczeniowych.

Zaproponowana struktura układu regulacji umożliwia prostą realizację programową i nie wymaga znacznej mocy obliczeniowej mikroprocesora, co pozwala na zaimplementowanie jej w praktycznie każdym mikrokontrolerze. Nie jest także konieczny pomiar aktualnego obciążenia silnika mocą czynną. Odpowiedni dobór wag sygnałów błędów umożliwia skuteczne ograniczenie obszaru pracy silnika bez przeregulowań zapewniając bezpieczną pracę w stanie synchronicznym i niezakłóconą realizację nadrzędnych funkcji napędowych.

Liczne wdrożenia przemysłowe zaproponowanej struktury układu regulacji w mikroprocesorowo sterowanych blokach zasilania wzbudzenia silników synchronicznych zrealizowane przez firmę JJA Progres przy współudziale i pod nadzorem autora potwierdzają prawidłowość działania opracowanego rozwiązania.

**Autor:** dr inż. Marian Hyla, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: marian.hyla@polsl.pl

## LITERATURA

- [1] Plamitzer A.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1986
- [2] Bajorek Z.: Teoria maszyn elektrycznych, Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1987
- [3] Kaczmarek T., Zawirski K.: Układy napędowe z silnikiem synchronicznym. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 2000
- [4] Al-Hamrani M. M., Von Jouanne A., Wallace A.: Power factor correction in industrial facilities using adaptive excitation control of synchronous machines, Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Toronto, Ontario, Canada, 2002, pp.148-154
- [5] Igbinovia F. O., Fandi G., Švec J., Müller Z., Tlustý J.: Comparative review of reactive power compensation technologies, 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 2015, Kouty nad Desnou, 2015, pp. 2-7
- [6] Colak I., Bayindir R., Bay O.F.: Reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor, Energy Conversion and Management, vol. 44, no. 13, August 2003, pp.2189-2204
- [7] Hyla M.: Wpływ zapadów napięcia na pracę silnika synchronicznego dużej mocy z regulatorem mocy biernej. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2016, nr 2(526), s.55-64
- [8] Morse C. A., Mummer C. R., Martinez R. F., Gibbs I. A., Reynolds T.: Functional testing of a new digital excitation system. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, WA, , vol. 1, pp.637-642
- [9] Baechle M., Knazkins V., Smulders P. A., Stutz D.: Improving the performance of the stator current limiter of excitation control systems. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp.1-7
- [10] Hyla M.: Blok zasilania wzbudzenia silnika synchronicznego z regulatorem mocy biernej. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2015, nr 1(521), s.57-61
- [11] Hyla M.: Rozruch silnika synchronicznego z mikroprocesorowo sterowanym blokiem zasilania wzbudzenia. Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2017, s.177-184
- [12] Hyla M.: Wybrane aspekty sterowania tyrystorową wzbudnicą silnika synchronicznego. V Ogólnopolska Konferencja Naukowa Modelowanie i Symulacja MIS-5, Kościelisko 23-27 czerwca 2008, s.345-348