

Antoni IZWORSKI¹, Józef B. LEWOC², Marek SUPRONIUK³

¹ POLITECHNIKA WROCLAWSKA, INSTYTUT INFORMATYKI, AUTOMATYKI I ROBOTYKI, ul. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

² BPPIT LEADER LLC, ul. Wolbromska 15/4, 53-148 Wrocław

³ WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

Pomiar dynamiki obiektu w układzie regulacji

Dr inż. Antoni IZWORSKI

Pracownik naukowo-dydaktyczny Instytutu Informatyki, Automatyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej. Zainteresowania naukowe związane są z modelowaniem dynamiki obiektów sterowania oraz badaniem stabilności zamkniętych układów regulacji. Jest autorem wielu projektów systemów automatyki wdrożonych w instalacjach militarnych, przemysłowych i badawczych.



e-mail: antoni.izworski@pwr.edu.pl

Dr inż. Bogdan J. LEWOC

Jest absolwentem Wydziału Matematyki Uniwersytetu Wrocławskiego. Tytuł doktora uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w 1973 roku. W badaniach naukowych zajmuje się modelowaniem dynamiki i oporności na zakłócenia komputerowo zintegrowanych systemów zarządzania i wytwarzania. Jest członkiem Komitetu Technicznego IFAC TC9.5.



e-mail: leader@provider.pl

Dr inż. Marek SUPRONIUK

Pracownik Instytutu Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Zainteresowania naukowe związane są z badaniem struktury defektywnej w materiałach półprzewodnikowych, badaniem fotoprzewodnictwa, opisem kinetyki zjawisk zachodzących w materiałach półprzewodnikowych. Dodatkowo zainteresowania związane są z automatyką budynkową.



e-mail: msuproniuk@wat.edu.pl

Streszczenie

Przedstawiony tekst opisuje wybrane sposoby pomiaru dynamiki obiektu. Przedstawiono klasyczne procedury wyznaczania parametrów uproszczonego modelu obiektu Kűpfmüllera i Strejca oraz sposoby doboru optymalnych nastaw regulatora typu PID. Opisano wykorzystanie metody momentów do wyznaczania parametrów dla modelu Strejca. Przeprowadzono badania symulacyjne proponowanych metod. Badania te ukazują, jak w sposób praktyczny zastosować proponowane modele opisu dynamiki obiektu.

Słowa kluczowe: dynamika obiektu, układ regulacji, model uproszczony obiektu, dobór nastaw regulatora.

Measurement of the dynamics of an object in an automatic control system

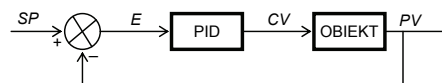
Abstract

The paper describes the ways of creation of the dynamics model of objects used in automatic control systems. In a closed control system, a continuous controller of the PID type is applied. To obtain a stable automatic control system, the controller settings should be selected. These parameters depend on the object dynamics, the kind of disturbances occurring in the system and the quality criteria accepted. There was undertaken the problem of creation of simplified object dynamics descriptions used in investigations for closed automatic control systems. Analytical, graphical and simulation methods were proposed for determination of parameters in simplified systems. The investigations were performed in Matlab Simulink simulation programs. The selection of the dynamic parameters of objects was made for the Kűpfműller model and the Strejc models (of the second, third and fourth order). The use of simulation methods will enable showing in a practical way, how to realize the object dynamics measurements. The investigations conducted confirmed the possibility of using the method proposed and, in particular, the method of the moments of the step response of the object for determination of simplified control object models. The simulation results obtained show how the solutions proposed may be applied in a practical way.

Keywords: object dynamics, automatic control system, simplified object model, controller setting selection.

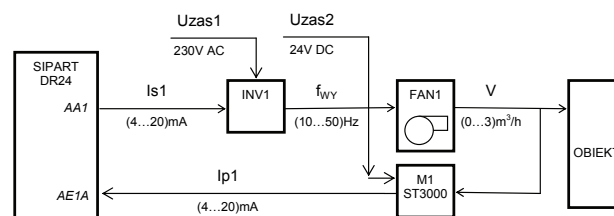
1. Wstęp

W zamkniętym układzie regulacji, przedstawionym na rysunku 1, wykorzystuje się regulator ciągły typu PID. Aby uzyskać stabilny układ regulacji, należy dobrać nastawy regulatora. Parametry te zależą od dynamiki obiektu, rodzaju zakłóceń występujących w układzie oraz od przyjętych kryteriów jakości. Kryteria jakości zwykle opisują wymagania na błąd regulacji E lub zmienną procesową PV .



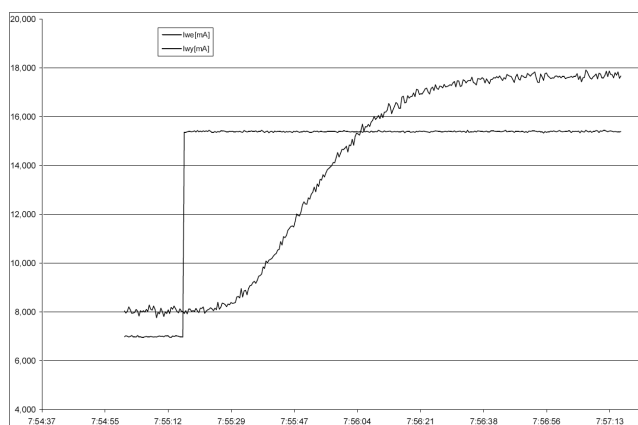
Rys. 1. Sygnały w zamkniętym układzie regulacji z regulatorem PID: SP - wartość zadana, PV - zmienna procesowa, $E=SP-PV$ - błąd, CV - zmienna sterująca
Fig. 1. Signals in a closed-loop system with the PID controller: SP – setpoint value, PV - process variable, $E=SP-PV$ – error, CV - control variable

W typowym układzie regulacji, oprócz urządzenia sterującego realizującego funkcję regulatora (np. PID), występują urządzenia pomiarowe i urządzenia wykonawcze. W układzie sterowania, przedstawionym na rysunku 2, funkcję urządzenia sterującego pełni urządzenie aparaturowe SIPART DR24. Jest to w pełni uniwersalne urządzenie, które zwykle pełni rolę regulatora oraz rolę koncentratora danych współpracującego z innymi urządzeniami. Wielkością fizyczną, stabilizowaną w tym układzie, jest przepływ powietrza. Pomiar tej wielkości jest realizowany za pomocą dwuprzewodowego przetwornika ST3000 firmy Endress+Hauser, pracującego w standardzie (4...20) mA. Tor wykonawczy zrealizowano w oparciu o inwerter oraz dmuchawę. Jednostka sterująca zadaje wartość prądu sterującego I_{s1} dla inwertera. Z kolei inwerter podaje wymaganą częstotliwość napięcia zasilania na silnik dmuchawy. Zmieniając częstotliwość, wpływamy na prędkość obrotową wentylatora i tym samym na wartość przepływu powietrza w procesie technologicznym.



Rys. 2. Sprzętowa realizacja zamkniętego układu regulacji
Fig. 2. Hardware implementation of the closed loop control

Aby zapewnić stabilną pracę tej pętli regulacji, należy przeprowadzić identyfikację parametrów dynamicznych obiektu sterowania oraz dobrać odpowiednie nastawy regulatora PID (zrealizowanego w sposób programowy w jednostce sterującej). Przedstawiony układ jest zwykle nieliniowy, głównie z powodu charakterystyki dmuchawy. W celu przeprowadzenia identyfikacji obiektu, w trybie sterowania ręcznego podano skokowy sygnał sterujący. Zarejestrowany przebieg sygnału wymuszającego i odpowiedź obiektu pokazano na rysunku 3. Zauważmy, że przedstawione przebiegi są zakłócone. Filtrowanie tych zakłóceń może spowodować utratę pierwotnej informacji o obiekcie. Zwykle zakłócenia występujące w obiekcie zmieniają swój charakter i mogą zależeć od stanu pracy innych urządzeń wykonawczych w obiekcie sterowania.



Rys. 3. Przebiegi czasowe prądu sterującego pracą inwertera I_{we} oraz prądu pomiarowego z czujnika przepływu I_{wy} podczas procedury identyfikacji parametrów dynamicznych obiektu

Fig. 3. Time waveforms of inverter control current I_{we} and measuring current I_{wy} of the flow sensor during the procedure of identification of the object dynamic parameters

Nastawy regulatora muszą być dopasowane do dynamiki obiektu. Zwykle nie znamy dokładnego opisu obiektu i wykorzystujemy opisy uproszczone. Jakość rezultatu końcowego, zadawalająca pracą zamkniętego układu sterowania, w istotny sposób zależy od przyjętego do badań modelu dynamiki obiektu. Dlatego, niezależnie od rodzaju algorytmów stosowanych w regulatorze, wyznaczenie modelu opisującego dynamikę obiektu jest istotnym zagadnieniem technicznym i badawczym.

2. Klasyczne modele uproszczone obiektów

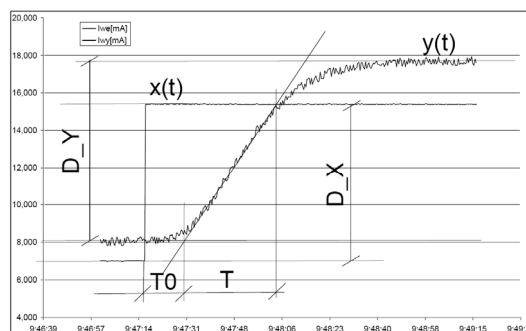
Jednym z klasycznych opisów jest model zaproponowany przez Kùpfmùllera [1] w roku 1928. Mimo, że minęło prawie sto lat od ogłoszenia tego uproszczonego modelu obiektu, nadal jest on jednym ze standardowych opisów. Współcześnie, mimo stosowania najnowszych technologii typu rozproszone systemy sterowania, w celu stabilizacji procesu nadal stosuje się takie uproszczone modele i regulatory PID. Przykładem mogą być prace [2, 3, 4]. W modelu Kùpfmùllera rzeczywisty obiekt jest przybliżony członem inercyjnym pierwszego rzędu o stałej czasowej inercji T , opóźnieniem o stałej czasowej opóźnienia T_0 oraz wzmocnieniem k

$$G_o(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k}{(Ts+1)} e^{-sT_0}. \quad (1)$$

Wyznaczenie modelu zastępczego wymaga przeprowadzenia aktywnego eksperymentu, polegającego na podaniu na wejście obiektu skokowego wymuszenia. Na rysunku 4 pokazano przebiegi sygnałów wejściowego i wyjściowego badanego obiektu oraz opis procedury graficznej prowadzącej do wyznaczenia modelu zastępczego.

Parametry modelu zastępczego określa się na podstawie odpowiedzi obiektu na skok jednostkowy. Sposób wyznaczania para-

metrów T i T_0 pokazano na rysunku 4. W punkcie przecięcia odpowiedzi skokowej obiektu należy prowadzić styczną. Przecina ona asymptoty poziome tej funkcji. Pozwala to na wyznaczenie parametrów czasowych modelu opisanego równaniem (1). Wzmocnienie k obiektu zostaje wyznaczone z zależności $k = \Delta Y / \Delta X$.



Rys. 4. Wyznaczenie parametrów modelu Kùpfmùllera

Fig. 4. Determination of the parameters of the Kùpfmùllera model

Dla badanego obiektu uzyskano współczynnik wzmocnienia $k=1,22$ mA/mA, zastępczą stałą czasową opóźnienia $T_0=13,3$ s oraz zastępczą stałą czasową inercji $T=44,2$ s. Stąd otrzymujemy następujący model zastępczy badanego obiektu

$$G_{MO}(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-sT_0} = \frac{1,22[mA/mA]}{44,2[s] \cdot s + 1} e^{-s \cdot 13,3[s]}. \quad (2)$$

Komentując uzyskany rezultat, w postaci modelu uproszczonego opisanego równaniem (2), należy opisać warunki stosowania takiego modelu. W eksperymencie celowo wybrano określony punkt pracy układu. Wybrany zakres pracy (zmiana przepływu powietrza odpowiadająca prądowi pomiarowemu od 8 mA do 16 mA) obejmuje typowy zakres pracy identyfikowanego obiektu. Obiekt jest nieliniowy i dla innych zakresów zmian uzyskuje się inne modele dynamiki obiektu.

Znając parametry w modelu zastępczego Kùpfmùllera, możemy obliczyć nastawy optymalne regulatora. Nastawy takie podali Ziegler i Nichols [5] w 1942 roku. Obecnie powszechnie stosuje się nieco zmodyfikowane wersje tych nastaw, np. metodę QDR (Quarter – Decay Ratio) [6]. Sposób wyliczenia optymalnych nastaw regulatorów typu P, PI oraz PID podano w tabeli 1.

Tab. 1. Nastawy regulatora określone metodą QDR [6]

Tab. 1. Settings of the controller determined by the QDR method [6]

Typ regulatora	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{kT_0}$		
PI	$\frac{0,9T}{kT_0}$	$3,33T_0$	
PID	$\frac{1,2T}{kT_0}$	$2T_0$	$0,5T_0$

W literaturze znanych wiele innych reguł pozwalających na dobór nastaw regulatorów. Cytowana już praca [6] przeprowadza szczegółowe dyskusje na ten temat i zawiera zastawienia współcześnie stosowanych metod.

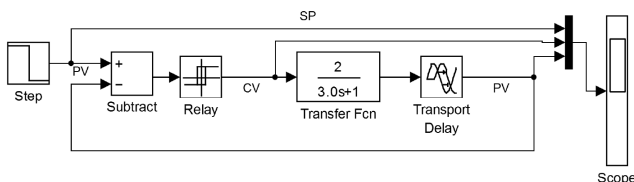
3. Model uproszczony obiektu wyznaczony w układzie regulacji dwustawnej

Wadą opisaną wyżej procedury wyznaczania modelu uproszczonego obiektu jest konieczność podania na wejście obiektu

skoku jednostkowego. W pewnych przypadkach takie postępowanie nie jest dopuszczalne, ponieważ może być niebezpieczne dla obiektu sterowania. Alternatywą jest wyznaczenie parametrów modelu obiektu na podstawie przebiegów czasowych występujących w zamkniętym układzie regulacji dwustawnej. Aby w układzie wystąpiły przełączenia, typowe dla regulacji dwustawnej, wzmacnienie obiektu i regulatora musi być większe od wartości ok. 1,7 [7]. Badania symulacyjne przeprowadzono dla modelu uproszczonego obiektu opisanego transmitancją

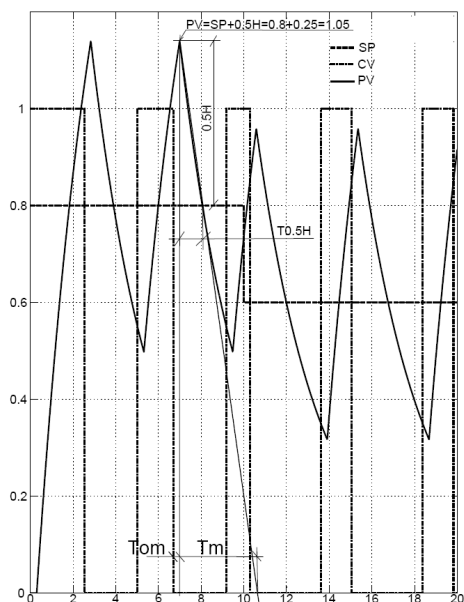
$$G_{MO}(s) = \frac{2}{(3s+1)} e^{-s \cdot 0,3} \quad (3)$$

Celem eksperymentu jest wygenerowanie przebiegów czasowych i na ich podstawie wyznaczenie parametrów modelu. Badania przeprowadzono w modelu symulacyjnym pokazanym na rysunku 5. Natomiast przebiegi czasowe uzyskane w układzie regulacji pokazano na rysunku 6.



Rys. 5. Model symulacyjny do badania układu regulacji dwustawnej
Fig. 5. A simulation model to study 2-state control

W badanym układzie regulacji wartość zadana zmienia się z wartości $SP=0,8$ na wartość $SP=0,6$. Wartość histerezy wynosi $H=0,5$ (jest ona parametrem przełącznika).



Rys. 6. Wyznaczenie parametrów modelu układu regulacji dwustawnej
Fig. 6. Determination of the parameters of 2-state control

Wartość zastępczej czasowej opóźnienia można wyznaczyć na podstawie pomiaru odstępu czasu od wyłączenia zmiennej sterującej CV do chwili osiągnięcia przez zmienną procesową PV wartości maksymalnej $PV_{max}=SP+0,5H$. Na podstawie badanego przebiegu określono $T_0=Tom=0,3$ s. Wyznaczona w ten sposób wartość jest zgodna z parametrem modelu uproszczonego.

W celu wyznaczenia stałej czasowej inercji T , należy odczytać czas $T_{0,5H}$. Wówczas zmierzona stała czasowa inercji wynosi $Tm=2T_{0,5H}(SP+H)/H$. Z badań symulacyjnych wynika, że można

obliczyć wartość stałej czasowej inercji w modelu zastępczym obiektu z zależności $T=Tm/1,35$. Natomiast w celu wyznaczenia wzmacnienia obiektu, należy zmniejszać wzmacnienie regulatora, aż przełącznik przestanie przełączać. Wówczas wzmacnienie obiektu k wyznaczamy jako iloraz ustalonego wyjścia obiektu i wzmacnienia regulatora.

4. Metoda momentów odpowiedzi skokowej obiektu

Metoda ta bazuje na wykorzystaniu odpowiedzi obiektu sterowania $y(t)$ na wymuszenie skokiem jednostkowym $x(t)=1(t)$. Zwykle obiekty sterowania opisywane są wieloma członami inercyjnymi i opóźnieniem co prowadzi do skomplikowanych opisów tych obiektów. W latach 90-tych XX wieku, Halawa [8] zaproponował wykorzystanie momentów różnicy wartości ustalonej i odpowiedzi skokowej obiektu, do wyznaczania modelu uproszczonego obiektu w postaci

$$G_{O2}(s) = \frac{y_{O2}(s)}{x(s)} = \frac{ka_2^2}{(s+a_2)^2} e^{-st_{O2}}, \quad (4)$$

$$G_{O3}(s) = \frac{y_{O3}(s)}{x(s)} = \frac{ka_3^3}{(s+a_3)^3} e^{-st_{O3}}, \quad (5)$$

$$G_{O4}(s) = \frac{y_{O4}(s)}{x(s)} = \frac{ka_4^4}{(s+a_4)^4} e^{-st_{O4}}. \quad (6)$$

Dla każdego z obiektów odpowiedź na skok jednostkowy ma ustaloną wartość

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{O_i}(s) = k, i=2,3,4. \quad (7)$$

Do wyznaczania parametrów transmitancji (4), (5), (6) wystarczy znajomość dwóch momentów

$$M_0 = \int_0^{\infty} R(t) dt, \quad (8)$$

$$M_1 = \int_0^{\infty} t \cdot R(t) dt, \quad (9)$$

gdzie: $R(t)=k-y(t)$. Metoda ta ma istotne znaczenie praktyczne, ponieważ całki (8) i (9) łatwo wyznaczyć w sposób symulacyjny, bądź podczas aktywnego eksperymentu na obiekcie rzeczywistym. Zwykle górną granicę całkowania zastępuje się czasem skończonym t_p , po którym odpowiedź skokowa obiektu ustala się.

W modelach zastępczych (4), (5) i (6) indeksy w funkcjach G przypominają o potędze zmiennej s w liczniku i w mianowniku transmitancji. W sposób analityczny wyznacza się momenty różnicy wartości ustalonej i odpowiedzi skokowej obiektu opisanego równaniami (4), (5) i (6). Następnie na tej podstawie można ustalić zależności pomiędzy momentami M_0 i M_1 funkcji $R(t)$ a parametrami modeli zastępczych (szczegółowo opisano to w [8]).

W rezultacie parametry dla modeli (4), (5) i (6) wyznaczamy odpowiednio z zależności (10), (11) bądź (12):

$$a_2 = \frac{-M_0 + \sqrt{M_0^2 - k M_1}}{M_1}, \quad (10)$$

$$t_{O2} = \frac{-M_0 + 2\sqrt{M_0^2 - k M_1}}{k},$$

$$a_3 = \sqrt{2 \frac{M_1}{k} - \left(\frac{M_0}{k}\right)^2}, \quad (11)$$

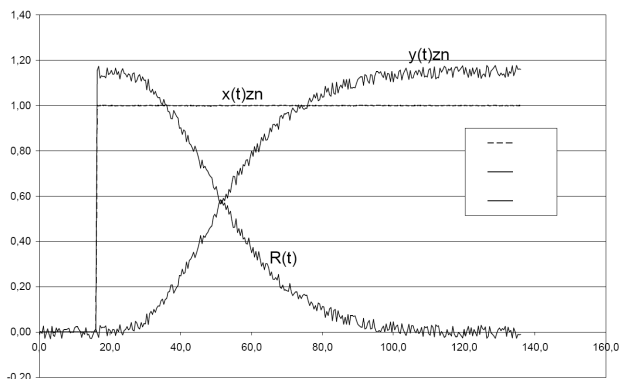
$$t_{O3} = \frac{M_0}{k} - \frac{3}{a_3},$$

$$a_4 = \sqrt{2 \frac{M_1}{k} - \left(\frac{M_0}{k}\right)^2}, \quad (12)$$

$$t_{O4} = \frac{M_0}{k} - \frac{4}{a_4}.$$

5. Wyznaczanie modeli uproszczonych

Opisaną wyżej procedurę budowania modelu obiektu, zastosowano do danych pomiarowych, pokazanych na rysunku 3. W celu zastosowania metody momentów, znormalizowano zakresy sygnałów wejścia i wyjścia obiektu tak, aby wymuszający sygnał skokowy był dokładnie sygnałem skoku jednostkowego $I(t)$. Również przesunięto wartość wyjścia obiektu tak, aby dla sygnału wejściowego równego zero, uzyskać wyjście obiektu również równe zero. Wartość ustalona wyjścia obiektu ustalona została eksperymentalnie na wartość $y_{znU}=1,15$. W celu uzyskania tej wartości eksperyment powtórzono kilka razy i wyznaczono momenty dla funkcji $R(t)$ w zależnościach (8) i (9). Uzyskane znormalizowane przebiegi pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Znormalizowane przebiegi funkcji wymuszającej $x_{zn}(t)$, znormalizowanego wyjścia obiektu $y_{zn}(t)$ oraz funkcji $R(t)$

Fig. 7. Normalized waveforms of input function $x_{zn}(t)$, normalized object output $y_{zn}(t)$ and function $R(t)$

W wyniku całkowania obliczono momenty funkcji $R(t)$

$$\begin{aligned} M_0 &= 43,80, \\ M_1 &= 1019,66. \end{aligned} \quad (13)$$

Jako granicę całkowania przyjęto wartość $T_F=135[s]$. Wartość tą ustalono eksperymentalnie. W przypadku całkowania sygnałów z rzeczywistego obiektu, funkcja $R(t)$ nigdy nie osiąga wartości zero. W wyniku zakłóceń występujących w obiekcie i analogowych torach pomiarowych, przyjmuje ona niewielkie wartości dodatnie lub ujemne. Jednak w przyjętym przedziale całkowania, pod koniec tego przedziału, wartości obliczanych całek oscylowały w niewielkim przedziale wartości. Wykonano kilkanaście eksperymentów na obiekcie i stwierdzono, że wartość M_0 zmienia się od wartości 43,47 do wartości 43,82. Natomiast moment M_1 przyjmował w wykonanych eksperymentach wartości od 996,60

do 1030,74. Wartości podane w równaniu (13) są jednym z zestawów wartości, jakie otrzymano w eksperymencie.

Na podstawie obliczonych momentów (13) uzyskano zestaw następujących modeli uproszczonych dla zbadanego obiektu sterowania

$$G_{O2}(s) = \frac{1,15}{(14,34 \cdot s + 1)^2} e^{-s \cdot 9,41}, \quad (14)$$

$$G_{O3}(s) = \frac{1,15}{(10,37 \cdot s + 1)^3} e^{-s \cdot 6,97}, \quad (15)$$

$$G_{O4}(s) = \frac{1,15}{(8,98 \cdot s + 1)^4} e^{-s \cdot 2,16}. \quad (16)$$

Wyznaczone modele, opisują obiekt sterowania w znormalizowanych zmiennych. Przeskalowanie zmiennych zewnętrznych zapewnia zmianę sygnału wymuszającego $x(t)$ w zakresie od 0 do 1. Zakres zmian wyjścia obiektu, wynika z wartości wzmocnienia obiektu. Taka zmiana skal sygnałów może być bezpośrednio zaimplementowana w językach typowych programowania urządzeń sterujących (FDB w przypadku jednostki SIPART, bądź język stykowy w sterownikach PLC). Dopasowując zmienne wewnętrzne do standardu modułów wejść i wyjść obiektowych, trzeba skonfigurować odpowiednio moduły zewnętrzne urządzenia.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymenty na obiekcie potwierdziły możliwość wykorzystania proponowanych metod, a w szczególności metody momentów odpowiedzi skokowej obiektu, do wyznaczania modeli uproszczonych obiektu sterowania. Uzyskane wyniki symulacyjne oraz rzeczywiste eksperymenty na obiekcie pokazują, jak w sposób praktyczny stosować proponowane rozwiązania. Przedstawione w sposób graficzny wyniki symulacji pokazują, jak w praktyczny sposób stosować proponowane rozwiązania.

7. Literatura

- [1] Küpfmüller K.: Übr die Dynamik der selbsttätigen Verstärkungsglieder. Elektrische Nachrichtentechnik, vol. 5, no. 11, 459-467, 1928.
- [2] Halawa J., Trzmielak-Stanisławska A.: Wyglądanie, identyfikacja i sterowanie wyizolowanym podsystemem elektroenergetycznym. Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr 8, 261-265.
- [3] Król D., Lower M., Szlachetko B.: Selection and setting of an intelligent fuzzy regulator based on nonlinear model simulations of a helicopter in hover. New Generation Computing, 2009, vol. 27, nr 3, 215-237.
- [4] Żuchowski A.: Metoda pomiaru zapasu stabilności w układzie regulacji automatycznej. PAK 2014 nr 04, s. 241-243.
- [5] Ziegler J.G., Nichols N.B.: Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the A.S.M.E, 1942.
- [6] Solnik W., Zajda Z.: Sieci Profibus DP w praktyce przemysłowej, przykłady zastosowań. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2013.
- [7] Halawa J.: Metoda identyfikacji i komputerowe obliczanie parametrów regulatorów z wykorzystaniem modeli uproszczonych. Przegląd Elektrotechniczny, 84 (2008), nr 6, 125-127.
- [8] Halawa J.: Symulacja i komputerowe projektowanie dynamiki układów sterowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.

otrzymano / received: 06.06.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2014

artykuł recenzowany / revised paper