

Modelowanie strukturalne i korekcja układów sterowania z wykorzystaniem systemu MATLAB

Structural modelling and correction of control systems using MATLAB

Streszczenie. W pracy przedstawiono podstawowe formy zapisu modelu układu dynamicznego jakie stosowane są w systemie MATLAB. Zaproponowano formułowanie równań stanu badanego układu dla wektora stanu, którego elementy są zmiennymi wyjściowymi układów składowych. Metoda opisu umożliwia opisanie układu otwartego i układu zamkniętego. Przedstawiono zastosowanie tej metody do modelu układu elektro-hydraulicznego z korektorem. Parametry korektora dobrano na podstawie wskaźnika jakości I_{111} . Wyznaczono skokowe układu zamkniętego.

Abstract. The paper presents the basic forms of notation of a dynamic system model that are used in MATLAB. It is proposed to formulate equations of state of the system under study for a state vector which elements are the output variables of the components. The description method makes it possible to describe an open system and a closed system. The application of this method to a model of an electro-hydraulic system with an corrector. The corrector parameters were selected on the basis of the quality index I_{111} . The step response of the closed system is presented.

Słowa kluczowe: Modelowanie strukturalne, przestrzeń stanu, korekcja, dobór parametrów

Keywords: Structural modelling, state space, correction, parameter tuning

Wprowadzenie

Zadania wynikające z potrzeb realizacji zadanych procesów są podstawą projektów układów regulacji. Pierwszym szeroko przyjętym takim regulatorem był układ regulacji prędkości obrotowej opracowany w 1798 roku przez Jamesa Watta, opisany matematycznie przez J. Maxwella w 1868 i analizowany przez E. Routha i A. Hurwitza w 1875. Dalszy intensywny rozwój teorii regulacji obserwowany jest w latach 30-tych i 40-tych XX wieku. H. Nyquist zaproponował wykorzystanie charakterystyk częstotliwościowych w układach regulacji (1932). W 1934 H. Black wprowadził pojęcie ujemnego sprzężenia zwrotnego do teorii regulacji. To podejście było kontynuowane przez H. Bodego (1938). Dalszy rozwój wniósł Evans w 1948 prezentując metodę miejsc geometrycznych pierwiastków - MGP (ang. method of root locus) [1]. W projektowaniu układów regulacji powszechnie stosowane są logarytmiczne charakterystyki częstotliwościowe ze względu na łatwość wyznaczania charakterystyk szeregowego połączenia liniowych układów dynamicznych.

Komputeryzacja procesu projektowania ułatwia jego realizację. Szczególnie użyteczny jest system MATLAB-Simulink firmy Mathworks. Już we wcześniejszych wersjach system ten miał przybornik Control Systems Toolbox. Po 2015 roku część funkcji tego przybornika została wbudowana w podstawowy system Matlaba. Funkcje te dotyczą modeli liniowych układów sterowania o stałych parametrach- LTI (ang. Linear Time-Invariant). Wyróżnić należy funkcje w dziedzinie czasu i dziedzinie częstotliwości. Stosowane są obiekty: „ss” – w przestrzeni stanu, „tf” – transmitancji wielomianowej, „zpk” – transmitancji pierwiastkowej oraz „frd” – charakterystyk częstotliwościowych. Najbardziej ogólny jest zapis modelu w przestrzeni stanu, który umożliwia badanie odpowiedzi na warunki początkowe oraz odpowiedzi na wymuszenie zewnętrzne. Pozostałe modele dotyczą opisu układu dynamicznego z zerowymi warunkami początkowymi. Warto o tym pamiętać, gdy wyznacza się modele dyskretne na podstawie modeli ciągłych. Na ogół zmienne stanu dla modelu ss mogą być różne od zmiennych stanu modeli transmitancyjnych i różne od zmiennych stanu poszczególnych elementów analizowanego systemu.

W [2] sformułowana następująco definicję systemu: System (układ) jest to zbiór podsystemów (pod-układów)

połączonych dla realizacji określonych zadań. Według tej definicji można wyróżnić zbiór układów – elementów i strukturę połączeń. Taką dekompozycja może być przeprowadzana dla każdego z elementów i może trwać aż do uzyskania możliwie prostego opisu podukładu. Najczęściej wykonywana jest jednorazowo i jako podukłady są układy dynamiczne takie jak integratory, inercje, układy oscylacyjne. Struktura połączeń podukładów do połączenia szeregowego, równoległe oraz sprzężenia zwrotnego. Tak połączone mogą stanowić otwarty układ sterowania albo mogą być użyte w zamkniętym układzie sterowania.

Model układu dynamicznego w przestrzeni stanu obejmuje równanie stanu i równania wyjściowe:

$$(1) \quad \begin{aligned} \mathbf{x}' &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, & \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_o \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned}$$

Należy zauważyć, że dla układów stacjonarnych procesy dynamiczne opisywane są tylko równaniem stanu. Równanie wyjściowe opisuje liniową kombinację wektora stanu i wektora wyjściowego. Parametry tej kombinacji zależą od zapisu wektora sygnałów wyjściowych. Dla metody fazowej [3], znanej też jako metoda zmiennej pomocniczej, elementy wektora stanu są współrzędnymi fazowej przestrzeni stanu. Dla metody kanonicznej [2, 4] nie występuje ta relacja. Inne są też macierze B i C. Ale w obu przypadkach współrzędne wektora stanu mogą nie zawierać współrzędnych stanu elementów (podukładów) systemu. Dla określenia sygnałów wyjściowych i wektorów stanu tych elementów systemu mogą być potrzebne dodatkowe równania wyjścia. W rezultacie model układu staje się bardziej złożony. W pracy zaproponowano metodę formułowania modelu w przestrzeni stanu odwzorowującej strukturę modelowanego układu. Elementy wektora stanu układu są współrzędnymi stanu poszczególnych podukładów analizowanego systemu. Proces modelowania przedstawiono na przykładzie układu elektro-hydraulicznego.

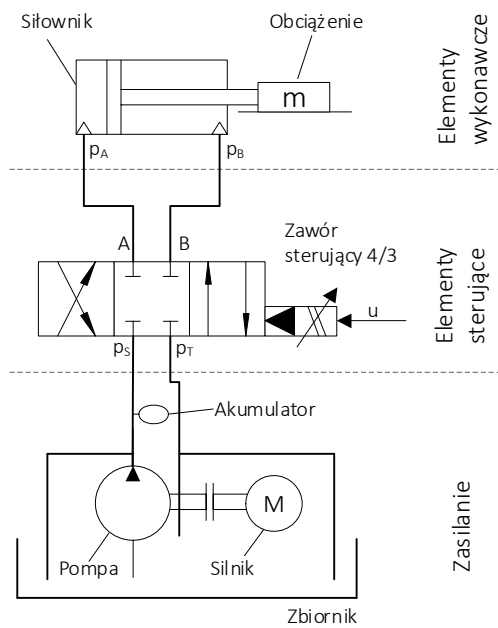
Model układu elektrohydraulicznego

Układy hydrauliczne są szeroko wykorzystywane w technice od czasu II wojny światowej, m. in. w urządzeniach przemysłowych, rolniczych, budowlanych czy górniczych. Główną ich zaletą jest prostota konstrukcji, wydajność

oraz łatwość sterowania i dokładność. Mogą one wytwarzać siły od kilku gramów do tysięcy ton.

Działanie układu hydraulicznego opiera się na wymuszonym i sterowanym przepływie cieczy hydraulicznej. Ruch cieczy jest tu wymuszany przez pompę, natomiast energia jest odbierana przez siłowniki hydrauliczne, których przykładem są cylindry hydrauliczne – zmieniające energię strumienia cieczy w ruch prostoliniowy tłoczyska.

Rozważany jest układ elektro-hydrauliczny z zaworem proporcjonalnym oraz siłownikiem dwustronnego działania. Schemat blokowy tego układu hydraulicznego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu elektrohydraulicznego [6]

Podstawowe części tego układu to m.in.:

- zbiornik z cieczą hydrauliczną,
- pompa hydrauliczna,
- zawór (serwo-zawór) sterujący dopływem cieczy hydraulicznej do siłownika hydraulicznego [2],
- siłownik hydrauliczny.

Opis matematyczny poszczególnych elementów jest dość złożony ze względu na opis przepływu cieczy i sterowanie tym przepływem. Z tego względu wprowadzono następujące uproszczenia:

- ciśnienie zasilania regulacyjnego zaworu proporcjonalnego jest stałe,
- nie występują straty ciśnień między zaworem a komorami siłownika,
- temperatura, a zatem i lepkość oleju są stałe,
- objętościowy moduł ściśliwości oleju jest stały w całym zakresie zmian ciśnienia,
- sprawności objętościowe siłownika i zaworu regulującego są bezstratne (równe jedności),

Często przyjmuje się, że problem sterowania można sprowadzić tylko do problemu sterowania zaworem (serwozawór, elektrozawór) regulującym dopływ cieczy do siłownika [5]. W ten sposób pomija się element wykonawczy o największej bezwładności. Dlatego dalej przyjęto, że cylinder modelowany jest jako podwójny integrator, zaś elektrozawór opisany jest jako człon inercyjny o stałej czasowej T . Taki model serwozaworu jest proponowany w [6]. W [7] przeprowadzono proces

identyfikacji i badania odpowiedzi skokowej serwozaworu potwierdziły prawidłowość takiego modelu. W publikacjach [6] i [7] oszacowano wartość stałej czasowej. Wynosiła ona odpowiednio 20 i 30 milisekund. Ostatecznie przyjęto, że transmitancja połączenia elektrozaworu i cylindra hydraulicznego między położeniem tłoczyska $X(s)$ i sygnałem sterującym $U(s)$ ma postać:

$$(2) \quad G_s(\underline{s}) = \frac{k}{(T\underline{s} + 1)\underline{s}^2}$$

Wzmocnienie k zawiera zastępcze, łączne wzmocnienie elektrozaworu i cylindra, \underline{s} - oznacza operator Laplace'a. Układ posiadający taką transmitancję jest układem niestabilnym. Odpowiedź impulsowa nie wraca do stanu początkowego, a charakterystyka Nyquista układu o takiej transmitancji obejmuje punkt $(-1, j0)$. Aby sterować układem o takiej transmitancji konieczna jest korekcja w pętli sterowania. Uwzględniając, że układ zawiera podwójny integrator, co odpowiada podwójnemu biegunowi w punkcie $(0, j0)$, stosowanie regulatora PI lub PID, jak w [5,6], jest niecelowe.

Modelowanie strukturalne

Pierwotny operator Laplace'a oznaczono dodatkowo pokreśleniem. Wprowadzając $s = T\underline{s}$ wykorzystujemy przeskalowany operator Laplace'a, zmieniamy wzmocnienie układu oraz również skalę czasu. Wtedy transmitancję (1) można przedstawić następująco:

$$(3) \quad G_s(s) = \frac{K}{(s+1)s^2}$$

gdzie: $K = T^2 k$, $s = T\underline{s}$.

Układ ten, gdy pracuje w układzie zamkniętym jest niestabilny zarówno dla K dodatnich, jak i ujemnych. Aby uzyskać stabilny układ serwomechanizmu, należy zastosować korektor przyspieszający o transmitancji:

$$(4) \quad G_c(s) = \frac{T_c \cdot s + 1}{\frac{1}{N} T_c \cdot s + 1} = N \frac{s + a}{s + a \cdot N}$$

gdzie $N > 2$ – stała korektora przyspieszającego, zaś $a = (1/T_c) > 0$ – zero, pierwiastek licznika korektora, skalowany względem stałej czasowej serwozaworu. Łączna transmitancja układu otwartego przybiera postać:

$$(5) \quad G_o(s) = G_c(s) \cdot G_s(s) = \frac{N \cdot K (s + a)}{(s + Na)(s + 1)s^2}$$

Część elektromechaniczna wprowadza do $G_o(s)$ biegun podwójny dla $s = 0$ oraz pojedynczy dla $s = -1$. Trajektoria MGP zawsze rozpoczyna się w biegunach i kończą w zerach lub nieskończoności. Zero korektora $G_o(s)$ leży bliżej osi urojonych niż biegun wnoszony przez korektor. Parametry N i a umożliwiają odpowiednie usytuowanie zera i bieguna korektora względem biegunów analizowanego systemu dla układu otwartego. Zaś parametry N i K wpływają na własności dynamiczne układu zamkniętego. Dobierając parametry w ramach projektowania najczęściej stosuje się metody częstotliwościowe, które zostały opracowane w latach czterdziestych XX wieku. Technika CAD ułatwiła prowadzenie obliczeń marginesów amplitudy i fazy, indeksu współczynnika oscylacyjności sporządzanie wykresów charakterystyk częstotliwościowych, odpowiedzi

skokowych, impulsowych i sinusoidalnych. W tych obliczeniach stosowane jest programowanie obiektowe. Wprowadzenie transmitancji (5) w MATLABie można zrealizować poleceniami:

```
N=5; a= 0.4; K=0.5;
s=tf('s');
Gos_t=N*K*(s+a)/((s+N*a)*(s+1)*s*s);
```

W wyniku tworzenia jest obiekt Gos_t typu tf. Chcąc otrzymać obiekt w przestrzeni stanu wystarczy wykorzystać polecenie:

```
Gos_s=ss(Gos_t);
```

Parametry obiektu (macierze) Gos_s przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Macierze równań stanu sformułowane na podstawie transmitancji

A =	x1	x2	x3	x4	B =	u1
x1	-3	-2	0	0	x1	2
x2	1	0	0	0	x2	0
x3	0	1	0	0	x3	0
x4	0	0	1	0	x4	0
C =	x1	x2	x3	x4	D =	u1
y1	0	0	1.25	0.5	y1	0

Elementy poszczególnych macierzy wiążą się z parametrami równania charakterystycznego wyznaczonego dla transmitancji układu otwartego:

$$(6) \quad G_o(s) = \frac{1}{s} \frac{1}{s} \frac{N \cdot K}{s+1} \left(\frac{a(1-N)}{s+Na} + 1 \right)$$

Proces tworzenia modelu strukturalnego zostanie przedstawiony na przykładzie powyższego modelu układu elektro-hydraulicznego jako serwomechanizmu. Bieguny poszczególnych bloków wynoszą odpowiednio: 0, 0, -1, -N·a i są położone głównej diagonal. Szeregowe połączenia tych bloków jest przedstawione poprzez niezerowe elementy położone na diagonalu znajdującej się bezpośrednio nad diagonalą główną. Bloki sumowania na wejściu bloku dynamicznego realizowane jest przez niezerowe elementy macierzy A i B, w wierszu danego bloku. Te dwie macierze opisują dynamikę układu otwartego – tabela 2. Aby móc wykorzystać funkcje dla obiektu w przestrzeni stanu dopisano macierze C i D, przyjmując, że sygnał wyjściowy układu jest równy pierwszemu elementowi wektora stanu.

Tabela 2. Macierze stanu układu otwartego serwomechanizmu

A =	x1	x2	x3	x4	B =	u1
x1	0	1	0	0	x1	0
x2	0	0	1	0	x2	0
x3	0	0	-1	N*K	x3	N*K
x4	0	0	0	-N*a	x4	a*(1-N)
C =	x1	x2	x3	x4	D =	u1
y1	1	0	0	0	y1	0

Nieco komplikuje się zapis tych macierzy dla układu ze sprzężeniem zwrotnym - układu zamkniętego. W tym celu przyjmuje się, że sygnał wejściowy układu otwartego u_o zastępuje się sygnałem uchybu układu zamkniętego e .

$$(7) \quad \mathbf{x}' = \mathbf{A}_o \mathbf{x} + \mathbf{B}e$$

Z kolei sygnał uchybu e w układzie zamkniętym opisany jest równaniem:

$$(8) \quad e = u_z - x(1)$$

Stosując sposób oznaczania kolumn przyjęty w MATLABie pierwszą kolumnę macierzy \mathbf{A}_o oznaczono jako $\mathbf{A}_o(:,1)$. Po podstawieniu (8) do (7) uzyskuje się pierwszą kolumnę macierzy \mathbf{A}_z układu zamkniętego uzyskuje się w postaci:

$$(9) \quad \mathbf{A}_z(:,1) = \mathbf{A}_o(:,1) - \mathbf{B}$$

Pozostałe kolumny macierzy \mathbf{A}_z są takie jak macierzy \mathbf{A}_o . W efekcie uzyskuje się macierze zapisu zamkniętego układu regulacji przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Macierze stanu układu zamkniętego serwomechanizmu

A =	x1	x2	x3	x4	B =	u1
x1	0	1	0	0	x1	0
x2	0	0	1	0	x2	0
x3	-N*K	0	-1	N*K	x3	N*K
x4	N*a-a	0	0	-N*a	x4	a-N*a
C =	x1	x2	x3	x4	D =	u1
y1	-1	0	0	0	y1	1

Wielkością wyjściową w tym przypadku jest uchyb regulacji, określony w (8).

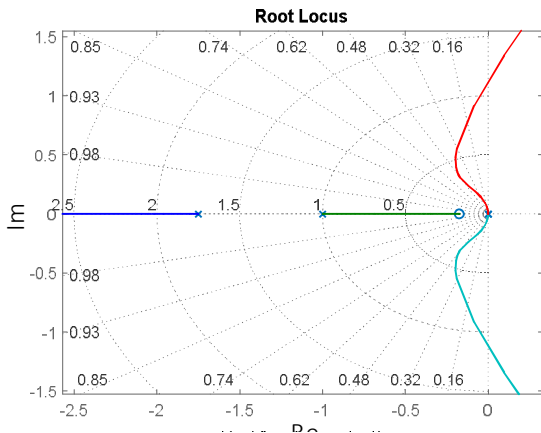
Dobór parametrów układu sterowania

Dobór parametrów rozważanego układu najczęściej realizowany jest na podstawie charakterystyk częstotliwościowych [1, 4] transmitancji układu otwartego. Nie znaleziono w literaturze wykorzystywania w tym celu równań stanu. W tym przypadku problem jest trójwymiarowy i dotyczy zmiennych N , K , a . Stosując MATLABa można ten problem sprowadzić do optymalizacji wskaźnika jakości, którego ogólną postać można przedstawić następująco:

$$(10) \quad QI_{nm} = \int_0^{\infty} |e|^n t^m dt$$

Najczęściej stosowany jest wskaźnik QI_{111} i taki wskaźnik był wyznaczany w niniejszej pracy. Niżej przedstawiono program wyznaczania tego wskaźnika jakości w funkcji wspomnianych parametrów. Dla skrócenia zapisu macierzy A i C wprowadzono dodatkowe zmienne V_a , V_b i V_c . Zakresy zmienności parametrów N i a dobrano analizując własności trajektorii biegunów w MGP. Trajektorie wychodzącego z podwójnego bieguna w zerze wychodzą po osi urojonych na prawą półpłaszczyznę. Korektor „wciąga” te trajektorie na lewą półpłaszczyznę, gdy biegun korektora jest mniejszy od bieguna obiektu i zero zbliża się do podwójnego bieguna. Do zera korektora zdąża trajektoria wychodząca z bieguna (-1) obiektu. Trajektorja wychodząca z bieguna korektora zmierza do nieskończoności. Z układu trajektorii wynika, że zero powinno być położone na osi rzeczywistych między biegunami w zerze i biegunem obiektu sterowania. Biegun korektora powinien być położony możliwie najdalej od osi urojonych. To wiąże się ze zmienną N . Wpływ wartości tej zmiennej sprawdzono i stwierdzono, że wartość ta powinna być większa od 5, wtedy to korektor wnosi maksymalne przesunięcie fazowe większe ok. 60 stopni [8]. Trajektorie biegunów dla $N=10$, $a=0.175$ przedstawiono na rysunku 2.

Dalsze badania prowadzono obliczenia dla dwu parametrów. Analizowano wykresy 3-D wskaźnika jakości w funkcji tych parametrów. Wskaźnik ten wyznaczano dla odpowiedzi skokowej uchybu regulacji – polecenie step. Na podstawie tej odpowiedzi wyznaczano funkcję podcałkową wskaźnika (10), którą całkowano stosując metodę trapezów – polecenie trapz. Wyznaczony w ten sposób wskaźnik pamiętany był w postaci macierzy wartości.



Rys. 2. Trajektorie biegunów układu o transmitancji (6) dla $N = 10$, $a = 0,175$

Niżej zamieszczono program wyznaczania tej macierzy.

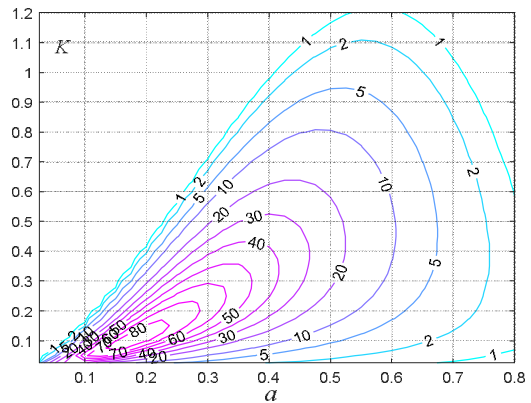
```
N=10 % 1<N
a_=0.025:0.025:0.8; k_=0.025:0.025:1.2;
Cz=[-1,0,0,0]; Dz=[1];
for n=1:size(k_,2)
    Vb=N*k_(n);
    for m=1:size(a_,2)
        Va=N*a_(m);
        Vc=(1-N)* a_(m);
        Az=[0,1,0,0;0,0,1,0;-Vb,0,-1,Vb;...
            -Vc,0,0,-Va]; Bz=[0;0;Vb;Vc];
        SysZa=ss(Az,Bz,Cz,Dz);
        [aE,tout]=step(SysZa,[0:0.025:100]);
        QI(n,m)=trapez(abs(aE).*tout);
    end % for m
end % for n
```

Wskaźnik jakości ma wartości w zakresie dodatnich liczb (do nieskończoności) i automatyczne skalowanie wykresów MATLABa powoduje, że wyniki są nieczytelne. Należy pamiętać, że gdy układ dobrze pracuje wskaźnik jakości ma wartość najmniejszą. Dlatego wprowadzono wskaźnik $inQI$, który jest odwrotnością wskaźnika QI . Program do sporządzania wykresów powierzchni i poziomic odwrótnego wskaźnika prezentowany jest niżej.

```
inQI=1./QI;
[ma_,mk_]=meshgrid(a_,k_);
figure(1)
surf(ma_,mk_,inQI)
figure(2)
[c,h]=contour(ma_,mk_,inQI*10^5, ...
    [1,2,5,[1:9]*10]);
clabel(c,h);
grid on
```

Wykres powierzchni przedstawia ogólny kształt zależności, wykres konturowy dokładniej pokazuje współrzędne szczególnych punktów wykresu. Wykres poziomicowy (konturowy) wskaźnika jakości układu zamkniętego dla $N=10$ przedstawiono na rysunku 3.

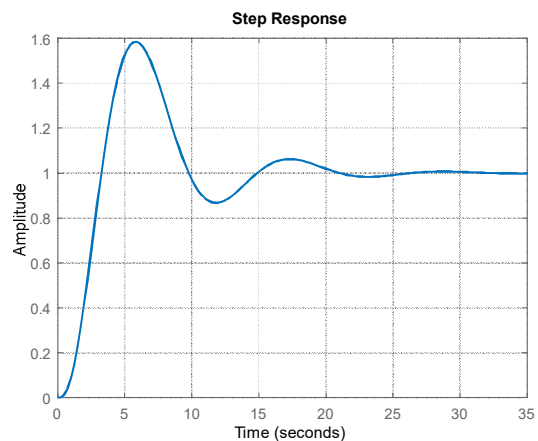
Na podstawie analizy wyników stwierdzono minimum wskaźnika QI występuje dla $a = 0.175$ i $K = 0.1$. Te wartości są zgodne z wykresem na rysunku 3. Dla tych wartości wyznaczono macierze układu zamkniętego i odpowiedź skokową tego układu.



Rys. 3. Wykres poziomicowy odwrótności wskaźnika QI_{111} dla układu zamkniętego dla $N=10$ w funkcji parametrów a i K

```
Vb=N*0.1; Va=N*0.175; Vc=(1-N)*0.1;
Az=[0,1,0,0;0,0,1,0;-Vb,0,-1,Vb;-Vc,0,0,-
Va];
Bz=[0;0;Vb;Vc];
Cz=[1,0,0,0]; Dz=[0];
SysZa=ss(Az,Bz,Cz,Dz);
figure(3)
step(SysZa);
grid on
```

Odpowiedź tą przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wykres odpowiedzi skokowej układu o transmitancji (3) z korektorem (4) dobranym według wskaźnika QI_{111} dla układu zamkniętego dla $N=10$, $K=0.1$ i $a = 0.175$

Otrzymana odpowiedź skokowa ma za duże przeregulowanie – 60%. Być może, że dla innych wskaźników jakości regulacji byłoby ono mniejsze. Należy dodać, że według zaleceń projektowych w [4] jako docelowe przeregulowanie przyjmowano 40%. Zastosowanie wstępnego filtra dolnoprzepustowego (nawet pierwszego rzędu) może zmniejszyć tą wielkość.

Podsumowanie

Proces projektowania układu sterowania jest najczęściej problemem wielowymiarowym. Każde zmniejszenie wymiarowości to uproszczenie procesu, zmniejszenie czasochłonności i kosztów. Dlatego ważne jest skalowanie częstotliwości (czasu). Czynniki uzyskane wyniki bardziej uniwersalnymi. Prezentowane modelowanie strukturalne jest wzorowane na metodzie stosowanej w modelowaniu analogowym. Pozwala ono przedstawić strukturę fizyczną w zapisie równania stanu, które reprezentuje w pełni

własności dynamiczne modelowanego układu, z uwzględnieniem warunków początkowych i wymuszenia.

W pracy przybliżono polecenia (rozkazy) MATLABa ułatwiające realizację procesu projektowania układu sterowania w dziedzinie czasu, w której może być łatwiej uwzględnić bloki nieliniowe niż w dziedzinie częstotliwości, wciąż dominującej w komputerowym wspomaganie projektowania układów regulacji.

W przedstawionej analizie zastosowano skalowanie częstotliwości i czasu. Oznacza to, że wyznaczone parametry korektora są odniesione do stałej czasowej serwozaworu.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Mirosław Wciślik, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: wcislik@tu.kielce.pl; mgr inż. Zawisza Siudajewski, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: zsiudajewski@tu.kielce.pl; dr inż. Paweł Strzabala, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: pstrzabala@tu.kielce.pl.

LITERATURA

- [1] Dorf, R.C., Bishop, R.H.: Modern control systems, 13th edition, Boston, Pearson, 2016
- [2] Wierzbicki A.P.: Modele i wrażliwość układów sterowania. WNT, Warszawa, 1977
- [3] Rosołowski E.: Automatyczne sterowanie i regulacja. Procesy ciągłe i dyskretne, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2020
- [4] Ogata K.: Modern Control Engineering, 5th Edition, Prentice Ha, New Jersey 2010
- [5] He Z., Feng Y., Liu Y., et al.: Semi-physical real-time control of electrohydraulic proportional position servo system based on Matlab/xPC, J. Eng., 2019, Vol. 2019 Iss. 13, pp. 144-149
- [6] Yalcin Efe: Dynamic model of a hydraulic servo system for a manipulator robot, Master of Science Thesis, KTH Electrical Engineering, Stockholm 2014
- [7] D.V. Ivanov et al.: Identification of slide valve dynamics with errors in variables, 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 560 012021
- [8] K. Suchenia, M. Wciślik: Problemy korekcji układów regulacji, Przegląd Elektrotechniczny, R.87,Nr 07/2011, str.64—67