

Mariusz CZAPLIŃSKI, Kazimierz DUZINKIEWICZ, Robert PIOTROWSKI
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Sterowanie ciśnieniem w stabilizatorze ciśnienia z wykorzystaniem metody sprzężenia od stanu i działania całkującego

Mgr inż. Mariusz CZAPLIŃSKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka) (2012r). Obecnie doktorant w Katedrze Inżynierii Systemów Sterowania. Zainteresowania naukowe dotyczą modelowania i sterowania procesami przemysłowymi oraz systemów realizacji produkcji i metod wspomagania decyzji w przemyśle.



e-mail: m.czaplinski88@gmail.com

Dr hab. inż. Kazimierz DUZINKIEWICZ

Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej, specjalność Automatyka i Metrologia Elektryczna. W roku 1983 tamże doktorat, a w 2009 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obszar zainteresowań to: modelowanie i estymacja w warunkach niepewności, struktury i algorytmy sterowania, sterowanie optymalizujące wielkimi systemami.



e-mail: k.duzinkiewicz@eia.pg.gda.pl

Dr inż. Robert PIOTROWSKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka) (2001r.). W roku 2005 uzyskał stopień doktora (Automatyka i Robotyka). Obecnie adiunkt w Katedrze Inżynierii Systemów Sterowania. Zainteresowania naukowe dotyczą modelowania i zaawansowanych metod sterowania procesami przemysłowymi.



e-mail: r.piotrowski@eia.pg.gda.pl

Streszczenie

W elektrowni jądrowej z reaktorem wodno ciśnieniowym, ważną funkcję pełni stabilizator ciśnienia odpowiedzialny za utrzymanie właściwego ciśnienia oraz masy wody w obiegu pierwotnym. W artykule rozważany jest układ regulacji ciśnienia w stabilizatorze ciśnienia. Jego zadaniem jest utrzymanie stałej wartości ciśnienia chłodziwa obiegu pierwotnego gwarantującego, z jednej strony bezpieczeństwo pracy reaktora (zapobieganie wrzeniu chłodziwa), a z drugiej strony utrzymanie odpowiednich parametrów pracy w obiegu wtórnym. Uzasadnione jest zatem użycie modelu liniowego do syntezy układu sterowania. Artykuł podejmuje analizę możliwości zastosowania sterowania ze sprzężeniem od stanu i działaniem całkującym. Dla modelu typu wejście-wyjście [1], zaproponowano model w przestrzeni stanu, a następnie opisano elementy syntezy układu sterowania. W badaniach symulacyjnych przeanalizowano wpływ zmiennych w czasie zakłóceń na jakość sterowania.

Słowa kluczowe: elektrownia jądrowa, modelowanie matematyczne, stabilizator ciśnienia, obieg pierwotny, sterowanie ze sprzężeniem od stanu, sterowanie z działaniem całkującym.

State feedback integral control of pressure in a nuclear power plant pressurizer

Abstract

In a nuclear power plant with a pressurized water reactor, a pressurizer has two tasks, pressure control in the primary circuit and coolant water level control. In the paper there is considered a pressure control system of the pressurizer which is responsible for control of pressure in the primary circuit at the setting value. It guarantees safe operation of the reactor (avoids boiling) and maintaining appropriate operating parameters in the secondary circuit. In this case it is reasonable to use a linear model for the synthesis of the control system. In the paper there is analysed the applicability of state feedback integral control of pressure in the pressurizer. For the input-output model [1] there is proposed a model in the state space. The components of synthesis the control system are described. In the simulation study there was examined the impact of time-varying disturbances on the control quality. The first section presents the motivation of research and general information about the primary circuit of a nuclear power plant with a pressurized water reactor. The next section contains a description of the modeled system, i.e. the pressurizer, and the references to other solutions of the pressure control issue. The third section is devoted to the

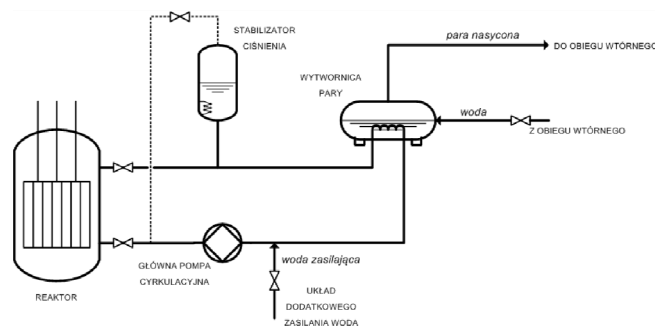
description, construction and implementation of the pressurizer mathematical model in Matlab/Simulink. The next section contains the description of synthesis of the control system with state feedback and integral action. The fifth section deals with implementation, computer simulation studies and analysis of results. The last section presents the summary of the work. The obtained results show the relevance and compliance of the designed control structure with reality. The designed system realizes the tasks assumed.

Keywords: nuclear power plant, mathematical modeling, pressurizer, primary circuit, state feedback control, integral control.

1. Wstęp

Energetyka jądrowa jest konkurencyjna ekonomicznie i ekologicznie w stosunku do elektrowni konwencjonalnych. Elektrownie jądrowe w systemach elektroenergetycznych są ważnym elementem polityki energetycznej wielu krajów. Zaostrzające się normy dotyczące emisji CO₂ oraz innych zanieczyszczeń skłaniają wiele państw, w tym Polskę, do rozpoczęcia lub wznowienia programu energetyki jądrowej. Rosnące wymagania dotyczące eksploatacji elektrowni jądrowej w zakresie efektywności, jakości, kosztów oraz bezpieczeństwa prowadzą do konieczności udoskonalania istniejących w elektrowniach rozwiązań.

Najbardziej rozpowszechnione są elektrownie wyposażone w reaktory wodne, wśród których wyróżnia się: reaktory wodno ciśnieniowe PWR (ang. Pressurized Water Reactor) i radzieckie WWR (rus. Wodno Wodianoj Energeticzeskij Reaktor) oraz wodne wrzące BWR (ang. Boiling Water Reactor). Stanowią one około 90% pracujących reaktorów energetycznych na świecie. W artykule rozważany będzie radziecki reaktor typu wodno ciśnieniowego, a dokładnie WWR 440/213 o mocy elektrycznej 440 MW pracujący w elektrowni jądrowej w Paks na Węgrzech, w którym moderatorem jest zwykła (lekka) woda pod ciśnieniem 12,5 MPa, pełniąca jednocześnie funkcję czynnika roboczego – chłodziwa rdzenia reaktora.



Rys. 1. Schemat obiegu pierwotnego
Fig. 1. Primary coolant circuit

Cechą charakterystyczną tych reaktorów są dwa obiegi czynnika roboczego – pierwotny i wtórny. W artykule rozważany będzie pierwszy z nich (rysunek 1), gdzie energia jądrowa ulega przemianie w energię cieplną.

Głównymi elementami obiegu pierwotnego są: reaktor, wytwornica pary, główna pompa cyrkulacyjna oraz stabilizator ciśnienia. W przypadku reaktora WWER przemiana energii jądrowej w ciepłą zachodzi poprzez reakcję łańcuchową rozszczepienia jąder w rdzeniu reaktora. Powstałą energię cieplną odbiera chłodziwo przepływające przez rdzeń. W zamkniętym obiegu chłodzenia złożonym z sześciu (dla reaktora WWER 440) równoległych pętli, chłodziwo pompowane jest za pomocą głównych pomp cyrkulacyjnych do wytwornicy pary pełniących funkcję wymiennika ciepła. Chłodziwo w obiegu pierwotnym – woda dejonizowana przepływająca przez rury grzewcze wytwornicy pary, przekazuje ciepło wodzie znajdującej się po stronie wtórnej na skutek czego ta paruje. Za utrzymanie wymaganego ciśnienia chłodziwa oraz wyrównanie zmian jego objętości w obiegu pierwotnym, odpowiedzialny jest stabilizator ciśnienia. Zmiany te powstają wskutek zmian temperatury pojawiających się w wyniku wahań mocy.

W artykule, wykorzystując powszechnie stosowany w literaturze model matematyczny stabilizatora ciśnienia [1], przedstawiono jego opis w przestrzeni stanu i dokonano jego komputerowej implementacji. Następnie zaprojektowano układ sterowania ze sprzężeniem od stanu i działaniem całkowącym, który zaimplementowano i przetestowano w środowisku Matlab/Simulink.

2. Opis stabilizatora ciśnienia w obiegu pierwotnym

Stabilizator ciśnienia w obiegu pierwotnym ma za zadanie utrzymać ciśnienie chłodziwa na zadanym poziomie oraz kompensować wahania objętości chłodziwa [2]. Jest on zbudowany z cylindrycznego zbiornika ciśnieniowego z zespawanymi na górze i dole czaszami oraz pierścieniami ze stali ferrytycznej. Wewnętrzne konstrukcje wykonane są ze stali nierdzewnej. W dolnej części znajdują się grzałki elektryczne i króćce rurowe łączące stabilizator z obiegiem pierwotnym. Dolna część wypełniona jest wodą, a górna parą nasyconą. W górnej czaszy stabilizatora znajdują się króćce rurowe zaworów: zrzutowych, bezpieczeństwa, odpowietrzenia oraz dysze wtryskowe.

Układ stabilizatora ciśnienia jest jednym z najważniejszych ruchomych układów pomocniczych obiegu pierwotnego. Odpowiada on za utrzymywanie ciśnienia chłodziwa w czasie ruchu w dopuszczalnym zakresie zmienności oraz zapobiega jego wrzeniu. Współdziała również z układem dodatkowego zasilania wodą (układ regulacji poziomu wody), który wyrównuje straty masy wody poprzez utrzymanie zadanego poziomu wody w stabilizatorze oraz reguluje stężenie kwasu borowego.

W górnej części zbiornika stabilizatora utrzymywana jest, za pomocą grzałek elektrycznych, poduszka pary nasyconej. Pewne cechy samoregulacji ciśnienia wynikają z właściwości fizycznych pary oraz wody w zbiorniku. W przypadku spadku ciśnienia następuje załączenie grzałek elektrycznych, powodując wzrost ilości pary wodnej ciśnienia. Spadek ciśnienia powstaje w wyniku zmniejszenia objętości chłodziwa spowodowanego obniżeniem temperatury w obiegu pierwotnym. W sytuacji wzrostu ciśnienia, wyłączane są grzałki elektryczne i następuje wtrysk wody z zimnej części rurowości głównej obiegu pierwotnego. Wtrysk wody odpowiada za obniżenie ciśnienia poprzez częścikowe skroplenie się pary wodnej. Przy bardzo szybkim wzroście ciśnienia na skutek gwałtownego wzrostu mocy, obniżenie ciśnienia układu odbywa się za pomocą zaworu zwrotnego. Armatura odpowietrzająca pozwala na uniknięcie przekroczenia wartości ciśnienia powodującej załączenie zaworów bezpieczeństwa.

Celem sterowania ciśnieniem w stabilizatorze jest stabilizacja ciśnienia chłodziwa w obiegu pierwotnym na wartości zadanej w dopuszczalnym zakresie zmian. Jest to zatem sterowanie stałowartościowe. Regulator steruje podgrzewaczami elektrycznymi oraz zaworami wtryskowymi na podstawie uchybu ciśnienia w stabilizatorze.

Rozwiązaniem stosowanym w elektrowni jądrowej w Paks na Węgrzech jest regulator dwupołożeniowy – włączający/wyłączający podgrzewacze w zależności od wartości ciśnienia. Innym rozwiązaniem jest regulator PI sterujący grzałkami na podstawie uchybu wartości ciśnienia w układzie zaprojektowanym dla elektrowni jądrowej w Żarnowcu w Polsce oraz Loviisa w Finlandii. Regulator PID został zaproponowany w rozwiązaniu firmy „Westinghouse” [3]. Trwają także prace nad nowoczesnymi układami sterowania ciśnieniem, np. sterowanie z modelem odwrotnym [1].

W celu implementacji nowoczesnego układu sterowania ciśnieniem konieczne jest zaprojektowanie nowego algorytmu sterowania. Jedną z powszechnie stosowanych metod rozwiązania problemu sterowania jest budowa modelu matematycznego obiektu sterowania. Proponowane w literaturze sterowanie z modelem odwrotnym [1] niesie ze sobą trudności związane ze złożoną implementacją w sterowniku PLC. Prezentowana w artykule metoda sterowania ciśnieniem charakteryzuje się prostotą aplikacji w sterowniku PLC oraz poprawą jakości sterowania w stosunku do obecnych rozwiązań.

3. Budowa modelu matematycznego stabilizatora ciśnienia

W literaturze znaleziono dwa podejścia do problemu modelowania stabilizatora ciśnienia. Pierwsze z nich [4] przedstawia model dynamiki stabilizatora w stanie nierównowagi, którego parametry zidentyfikowano za pomocą algorytmu PSO (ang. Particles Warm Optimization). Drugie podejście, rozważane w artykule, przedstawia model dynamiki stabilizatora w stanie równowagi, którego parametry wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów [1]. Jest on przeznaczony do zaprojektowania regulatora w nominalnych warunkach pracy (stan ustalony), gdzie faza gazowa znajduje się w stanie równowagi z fazą ciekłą. Dynamika fazy gazowej jest szybsza od innych zachodzących w systemie zjawisk dynamicznych, a masa pary wodnej jest pomijalnie mała w stosunku do innych mas w systemie. Dla uproszczenia budowy modelu założono, że stabilizator zawiera czystą wodę (pominięto zawartość boru) będącą w równowadze z parą nasyconą. Założono również, że właściwości fizyczno-chemiczne wody i ściany zbiornika stabilizatora ciśnienia oraz masy wody są stałe.

Wielkością wejściową w modelu jest moc grzewcza, wyrażona jako iloczyn liczby załączonych grzałek oraz mocy pojedynczej grzałki w zakresie ciągłym. Model matematyczny składa się z dwóch bilansów energii uzyskanych na podstawie zasady zachowania energii – bilansu energii dla wody oraz ściany zbiornika stabilizatora ciśnienia.

Bilans energii dla wody jest opisem dynamiki dostarczonych i odprowadzonych strumieni ciepła, które wyznaczają zmianę energii wewnętrznej wody w czasie. Budowa modelu opiera się na bilansie energii dostarczonej/odebranej związanej z wodą wpływającą do stabilizatora ciśnienia przez rurowości łączące go z obiegiem pierwotnym, wodą znajdującą się w stabilizatorze, ciepłem traconym wynikającym z przewodzenia przez ściany zbiornika stabilizatora związanych z różnicą temperatur oraz ciepłem dostarczonym odpowiadającym mocy grzałek cieplnych. Zależność tą dla wody opisuje równanie:

$$\frac{dE_{WW}(t)}{dt} = c_p m T_I(t) - c_p m T(t) + K_w (T_{WS}(t) - T(t)) + W_{HE} v(t) \quad (1)$$

gdzie: $E_{WW}(t)$ [J] – energia wewnętrzna wody w stabilizatorze ciśnienia, c_p $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right]$ – ciepło właściwe wody w stabilizatorze ciśnienia, m $\left[\frac{kg}{s}\right]$ – natężenie przepływu wody w stabilizatorze ciśnienia, $T_I(t)$ [$^\circ C$] – temperatura wody wpływającej do stabilizatora ciśnienia, $T(t)$ [$^\circ C$] – temperatura wody w stabilizatorze ciśnienia, K_w $\left[\frac{W}{^\circ C}\right]$ – współczynnik wymiany ciepła ściany zbiornika stabilizatora, $T_{WS}(t)$ [$^\circ C$] – temperatura ściany zbiornika stabilizatora

ciśnienia, W_{HE} [W] – moc grzewcza pojedynczego podgrzewacza elektrycznego, $v(t)$ [–] – liczba załączonych grzałek.

Bilans energii dla ściany stabilizatora składa się ze strat związanych z przewodzeniem przez ściany zbiornika stabilizatora oraz strat cieplnych ścian zbiornika do otoczenia:

$$\frac{dE_{WS}(t)}{dt} = K_w(T_{WS}(t) - T(t)) + W_{loss}(t) \quad (2)$$

gdzie: E_{WS} [J] – energia wewnętrzna ściany zbiornika w stabilizatorze ciśnienia, $W_{loss}(t)$ [W] – straty ciepłe systemu.

Model stabilizatora uzupełniają równania algebraiczne opisujące zależność między mierzalną temperaturą, a niemierzalną energią wewnętrzną:

$$E_{WW}(t) = c_p m T(t) \quad (3)$$

$$E_{WS}(t) = C_{pWS} m T_{WS}(t) \quad (4)$$

gdzie: C_{pWS} [$\frac{J}{sC}$] – pojemność cieplna ściany zbiornika stabilizatora ciśnienia.

Ciśnienie pary nasyconej w fazie gazowej w stabilizatorze jest silnie nieliniowo zależne od temperatury. Spadek temperatury chłodziwa powoduje spadek ciśnienia i konieczność załączenia grzałek. Zależność ciśnienia od temperatury przyjęto w postaci [1]:

$$p(T) = \frac{e^{\varphi(T)}}{100} \quad (5)$$

$$\varphi(T) = c_0 + c_1 T(t) + c_2 T(t)^2 + c_3 T(t)^3 \quad (6)$$

gdzie: $p(t)$ [Pa] – ciśnienie pary nasyconej w stabilizatorze ciśnienia, c_i [–], $i = 0, 1, 2$ – współczynniki funkcji wielomianowej.

Zakres zmian wartości ciśnienia jest równoważny zmianom ciśnienia w nominalnym trybie operacyjnym i wynosi od 10,56 MPa do 13,71 MPa dla temperatur z zakresu 315 – 350 °C. Przyjęto ciągły model grzałek i pominięto wtrysk wody do stabilizatora, zakładając jego pracę w nominalnym trybie operacyjnym.

Zmienne modelu: wejściowe: $v(t)$; wejściowe (zakłócenia): $T_I(t)$, $W_{loss}(t)$; stanu: $T(t)$, $T_{WS}(t)$; wyjściowe: $p(t)$.

W związku z przeznaczeniem modelu dla celów sterowania niezbędny jest pełny i jednoznaczny liniowy opis dynamiki obiektu w postaci zmiennych stanu:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}\mathbf{d}(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (8)$$

gdzie: \mathbf{A} – macierz stanu, \mathbf{B} – macierz wejść, \mathbf{C} – macierz wyjść, \mathbf{D} – macierz przenoszenia, \mathbf{E} – macierz zakłóceń, $\mathbf{x}(t) = [T(t) \ T_{WS}(t)]^T$ – wektor stanu, $\mathbf{u}(t) = v(t)$ – wymuszenie, $\mathbf{d}(t) = [T_I(t) \ W_{loss}(t)]^T$ – wektor zakłóceń, $\mathbf{y}(t) = p(t)$ – wyjście.

W celu uzyskania liniowego modelu dynamiki wymagana jest linearyzacja modelu układu (równania (5) – (6)) wokół punktu pracy dla stanu ustalonego, np. za pomocą rozwinięcia równań układu w szereg Taylora. Po linearyzacji macierze w równaniach (7) – (8) są postaci:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{m}{M} - \frac{K_W}{c_p M} & \frac{K_W}{c_p M} \\ \frac{K_W}{C_{pWS}} & -\frac{K_W}{C_{pWS}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} W_{HE} \\ c_p M \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \frac{m}{M} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_{pWS}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [3 * c_3 * T_0^2 + 2 * c_2 * T_0 + c_1 \quad 0], \quad \mathbf{D} = [0]$$

gdzie: $T_0 = 326,56$ °C – temperatura wody w stabilizatorze ciśnienia w punkcie pracy.

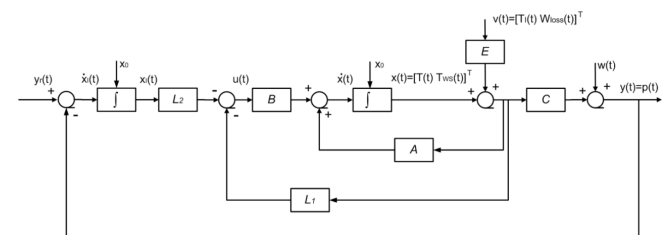
W tabeli 1 przedstawiono parametry stabilizatora ciśnienia, których wartości estymowano sympleksową metodą najmniejszych kwadratów [1].

Tab. 1. Parametry stabilizatora ciśnienia
Tab. 1. Pressurizer parameters

Parametr	Jednostka	Wartość	Parametr	Jednostka	Wartość
c_p	J/kg°C	4183	W_{HE}	W	90000
C_{pWS}	J/°C	$4,8477 \times 10^7$	c_0	MPa	$6,5358^{-1} \times 10$
K_W	W/°C	63204	c_1	MPa/°C	$4,8902^{-2} \times 10$
m	kg/s	0,15	c_2	MPa/°C ²	$-9,2658 \times 10^{-5}$
M	kg	30138	c_3	MPa/°C ³	$7,6835^{-7} \times 10$

4. Projektowanie układu sterowania ze sprzężeniem od stanu i działaniem całkującym

Celem sterowania w układzie stabilizacji ciśnienia jest utrzymanie ciśnienia na zadanej wartości, w granicach dopuszczalnych zmian oraz eliminacja wpływu zakłóceń działających na układ. Zmienną sterującą jest liczba załączonych grzałek $v(t)$, za pomocą której sterowana jest moc grzewcza grzałek elektrycznych. Zakłóceniami są: temperatura wody wpływającej do stabilizatora ciśnienia $T_I(t)$ oraz straty ciepłe do otoczenia ścian zbiornika stabilizatora $W_{loss}(t)$. Zaprojektowaną strukturę układu sterowania pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura układu sterowania ze sprzężeniem od stanu i działaniem całkującym

Fig. 2. Structure of state feedback integral control system

gdzie: $\mathbf{w}(t)$ – szum pomiarowy.

Sterowanie z działaniem całkującym rozszerza układ o element całkujący w pętli sterowania [5], który powinien zlikwidować uchyb ustalony. Wynika on z występowania stałych zakłóceń obciążenia, które są ułożone między wyjściem komparatora (uchyb sterowania), a punktami wejścia tych zakłóceń. Element całkujący rozszerza wektor zmiennych stanu o zmienną stanu całkowania. Jest to całka z błędu realizującego nadążanie wyjścia układu za wartością zadaną (równanie (10)). Układ jest zamknięty przez ujemne sprzężenie zwrotne (macierz L_1) oraz sprzężenie od stanu (macierz L_2). Macierz L odpowiada za przeprowadzenie wektora stanu układu $\mathbf{x}(t)$ ze stanu początkowego do stanu operacyjnego przy zadanych warunkach, poprzez alokację pożądanego biegunów układu zamkniętego [5]. Metoda alokacji biegunów układu, umożliwia kształtowanie dynamiki układu oraz parametrów odpowiedzi układu.

$$\dot{\mathbf{x}}_I(t) = \mathbf{y}_r(t) - \mathbf{y}(t) = \mathbf{y}_r(t) - \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (10)$$

gdzie: $x_I(t)$ – zmienna stanu całkowania, $y_r(t)$ – trajektoria zadana.

Pełny opis otwartego systemu sterowania (równanie (11)) oraz prawo sterowania (równanie (12)) są postaci:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}_I(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_I(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} y_r(t) \quad (11)$$

$$y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ x_I(t) \end{bmatrix}$$

$$u = -L_1 x(t) - L_2 x_I(t) = -[L_1 \quad L_2] \begin{bmatrix} x(t) \\ x_I(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

gdzie: I – macierz jednostkowa, L_1 – macierz sprzęż. zwrotnego, L_2 – macierz sprzężenia od stanu.

Po zamknięciu układu prawem sterowania pełny opis systemu opisuje równanie (13).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}_I(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BL_1 & -BL_2 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_I(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} y_r(t) \quad (13)$$

$$y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ x_I(t) \end{bmatrix}$$

Macierze L_1 oraz L_2 wyznaczone za pomocą wzoru Ackermanna [5], a warunkiem ich istnienia jest sterowalność układu. Wzór Ackermanna jest postaci:

$$L = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 1] Q_{ctrl}^{-1} p(A) \quad (14)$$

gdzie: $Q_{ctrl} = [B \quad AB \quad AB^2 \quad \dots \quad AB^{n-1}]$ – macierz sterowalności, $p(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \alpha_2 A^{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I$ – wielomian charakterystyczny macierzy A , α_n – współczynniki wielomianu charakterystycznego, n – rząd układu (liczba zmiennych stanu).

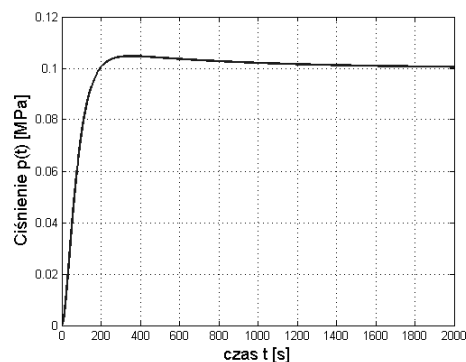
5. Badania symulacyjne i analiza wyników

Model matematyczny układu sterowania stabilizatorem ciśnienia zaimplementowano w środowisku Matlab/Simulink. W pierwszej kolejności, przeprowadzono testy symulacyjne układu sterowania ze sprzężeniem od stanu i działaniem całkującym bez zakłóceń. W następnych badaniach układ rozbudowano o zmienne w czasie zakłócenia.

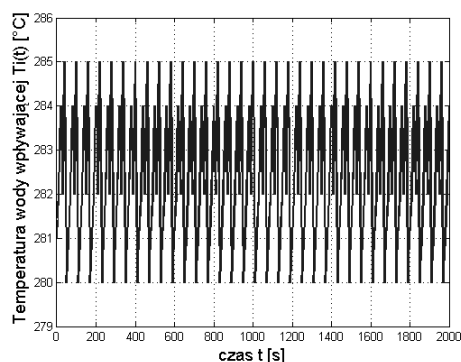
Rozbudowa układu sterowania o element całkujący wymusza dobór biegunów układu zamkniętego. W związku z pojawieniem się zmiennej stanu całkowania dobrano bieguny o współrzędnych: $-0,036$; $-0,018$ i $-0,0014$, aby uzyskać pożądane wskaźniki jakości sterowania: przeregulowanie poniżej 10 %, czas narastania w granicach 150 s oraz czas ustalania (rozumiany jako 0,98 wartości ustalonej) równy 180 s. Alokacji biegunów dokonano za pomocą macierzy $L_1 = [75066 \quad -45222]$ i $L_2 = -4161,7$. Na rysunku 3 przedstawiono odpowiedź skokową układu.

Odpowiedź układu cechuje szybki czas narastania – około 119 s, szybki czas ustalania – około 179 s oraz przeregulowanie w granicach 4,7 %. Wskaźniki jakości sterowania związane są bezpośrednio z położeniem biegunów układu. W przypadku konieczności redukcji lub zmiany któregoś ze wskaźników jakości sterowania możliwa jest zmiana rozmieszczenia biegunów pozwalająca na kształtowanie dynamiki odpowiedzi skokowej.

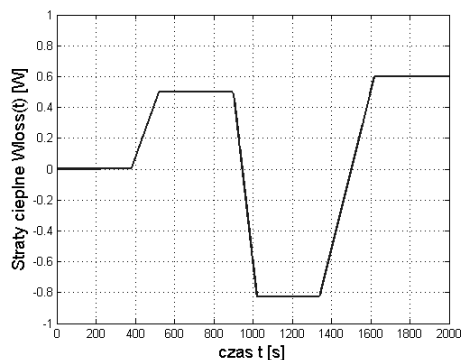
Stabilizator ciśnienia jest tylko jednym z elementów obiegu pierwotnego. Inne elementy oddziałują na niego w postaci zakłóceń. Na rysunkach 4 – 5 przedstawiono zmienne w czasie zakłócenia oddziałujące na układ: temperatura wody wpływającej, straty ciepłe układu. Dodano również stochastyczny szum pomiarowy o widmowej gęstości mocy równej 0,00001 W/Hz. Odpowiedź skokową układu sterowania dla tych warunków pokazano na rysunku 6.



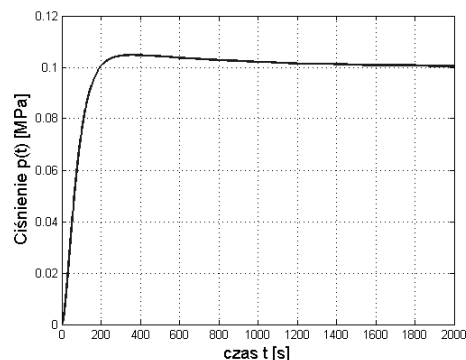
Rys. 3. Odpowiedź skokowa układu sterowania – brak zakłóceń
Fig. 3. Step response of the control system – without disturbances



Rys. 4. Temperatura wody wpływającej do stabilizatora (zakłócenie)
Fig. 4. Inlet water temperature (disturbance)



Rys. 5. Straty ciepłe systemu (zakłócenie)
Fig. 5. Heat loss of the system (disturbance)



Rys. 6. Odpowiedź skokowa układu sterowania – z zakłóceniami
Fig. 6. Step response of the control system – with disturbances

Wskaźniki jakości odpowiedzi są następujące: czas narastania – około 120 s, szybki czas ustalania – około 180 s oraz przeregulowanie w granicach 4,7 %. Odpowiedź wskazuje, że układ sterowania zapewnia porównywalną jakość sterowania w przypadku braku zakłóceń jak również w sytuacji ich występowania. Układ sterowania, analogicznie jak wcześniej, bardzo szybko osiąga wartość zadaną, a zakłócenia są kompensowane.

6. Podsumowanie

W artykule rozważano stabilizator ciśnienia, dla którego przedstawiono model matematyczny, a następnie zaproponowano nowoczesną metodę sterowania ciśnieniem. Zaprojektowany układ regulacji zaimplementowano oraz zbadano symulacyjnie w środowisku Matlab/Simulink. Uzyskane wyniki podkreślają zasadność, użyteczność i zgodność z oczekiwaniami zbudowanej struktury sterowania. Zaproponowany układ sterowania osiąga założone wskaźniki jakości sterowania niezależnie od wartości zmieniających się w czasie zakłóceń, w tym szumów pomiarowych.

Badania zostały wsparte przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Strategicznego Projektu Badawczego Nr SP/J/10/176450/12. Autorzy pragną wyrazić podziękowanie za wsparcie.

7. Literatura

- [1] Szabo Z., Szederkenyi G., Gaspar P., Varga I., Hangos K.M., Bokor J.: Identification and dynamic inversion – based control of a pressurizer at the Paks NPP. *Control Engineering Practice*, Vol. 18, No. 5 (2010), pp. 554–565.
- [2] Ackermann G.: *Eksploracja elektroniki jądrowej*. WNT, Warszawa, 1987.
- [3] Hołownia A., Wojtoń K.: *Systemy sterowania bloków jądrowych z reaktorami typu wodno-ciśnieniowego – przegląd układów i sprzętu*. Praca magisterska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektryczny, Gdańsk, 1987.
- [4] Li Y., Ma J., Chan A., Huang Y., Wang B.: Mechanism model of pressurizer in the pressurized water reactor nuclear power plant based on PSO algorithm. *Proc. of the 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Taiyuan, May 23-25, 2012.
- [5] Ostertag E.: *Mono – and Multivariable Control and Estimation: Linear, Quadratic and LMI Methods*. Springer – Verlag, 2011.

otrzymano / received: 07.04.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.02.2014

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Informacje dla Autorów

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, nie publikowane wcześniej w innych czasopismach. Redakcja nie zwraca materiałów nie zamówionych oraz zastrzega sobie prawo redagowania i skracania tekstów oraz streszczeń.

Artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie PAK są formatowane jednolicie zgodnie z ustaloną formatką zamieszczoną na stronie redakcyjnej www.pak.info.pl. Dlatego artykuły przekazywane redakcji należy przygotowywać w edytorze Microsoft Word 2003 (w formacie DOC) z zachowaniem:

- wielkości czcionek,
- odstępów między wierszami tekstu,
- odstępów przed i po rysunkach, wzorach i tabelach,
- oznaczeń we wzorach, tabelach i na rysunkach zgodnych z oznaczeniami w tekście,
- układu poszczególnych elementów na stronie.

Osobno należy przygotować w pliku w formacie DOC notki biograficzne autorów o objętości nie przekraczającej 450 znaków, zawierające podstawowe dane charakteryzujące działalność naukową, tytuły naukowe i zawodowe, miejsce pracy i zajmowane stanowiska, informacje o uprawianej dziedzinie, adres e-mail oraz aktualne zdjęcie autora o rozmiarze 3,8 x 2,7 cm zapisane w skali odcieni szarości lub dołączone w osobnym pliku (w formacie TIF).

Wszystkie materiały:

- artykuł (w formacie DOC),
- notki biograficzne autorów (w formacie DOC),
- zdjęcia i rysunki (w formacie TIF lub CDR),

prosimy przysyłać w formie plików oraz dodatkowo jako wydruki na białym papierze (lub w formacie PDF) na adres e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl lub pocztą zwykłą, na adres: Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola, Asystent Redaktora Naczelnego mgr Agnieszka Skórkowska, ul. Akademicka 10, p.21A, 44-100 Gliwice.

Wszystkie artykuły naukowe są dopuszczane do publikacji w czasopiśmie PAK po otrzymaniu pozytywnej recenzji. Autorzy materiałów nadesłanych do publikacji są odpowiedzialni za przestrzeganie prawa autorskiego. Zarówno treść pracy, jak i wykorzystane w niej ilustracje oraz tabele powinny stanowić dorobek własny Autora lub muszą być opisane zgodnie z zasadami cytowania, z powołaniem się na źródło cytatu.

Przedrukowywanie materiałów lub ich fragmentów wymaga pisemnej zgody redakcji. Redakcja ma prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i udostępniania dowolną techniką, w tym też elektroniczną oraz ma prawo do rozpowszechniania go dowolnymi kanałami dystrybucyjnymi.

