

**Bartosz PUCHALSKI, Tomasz RUTKOWSKI, Kazimierz DUZINKIEWCZ**POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk**Wieloobszarowa rozmyta regulacja PID mocy reaktora jądrowego****Mgr inż. Bartosz PUCHALSKI**

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, kierunek studiów Automatyka i Robotyka, specjalność Automatyka (tytuł mgr inż.) oraz kierunek studiów Elektrotechnika (tytuł inż.). Obecnie wykładowca oraz doktorant wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Obszar zainteresowań to: modelowanie i symulacja układów sterowania w pętli sprzętowej, struktury i algorytmy sterowania, systemy czasu rzeczywistego.

e-mail: [bpuchalski@eia.pg.gda.pl](mailto:bpuchalski@eia.pg.gda.pl)**Dr inż. Tomasz RUTKOWSKI**

W 2004 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie automatyka i robotyka nadany przez Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Jego obecne zainteresowania naukowe obejmują zaawansowane algorytmy sterowania, algorytmy estymacji, techniki inteligencji obliczeniowej oraz przemysłowe systemy sterowania.

e-mail: [t.rutkowski@eia.pg.gda.pl](mailto:t.rutkowski@eia.pg.gda.pl)**Dr hab. inż. Kazimierz DUZINKIEWCZ**

Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej, specjalność Automatyka i Metrologia Elektryczna. W roku 1983 także 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](mailto:k.duzinkiewicz@eia.pg.gda.pl)**1. Wstęp**

Elektrownie jądrowe ze względu na koszty wytwarzania energii elektrycznej typowo pracują na pokrycie obciążenia podstawowego w sieci elektroenergetycznej. Obecnie jednak ze względu na zmienność zapotrzebowania na energię elektryczną, wzrastający udział elektrowni jądrowych w produkcji tej energii, a także ze względu na działanie mechanizmów deregulacji rynku energii elektrycznej, coraz częściej elektrownie te pracują ze zmiennym obciążeniem. Elektrownie jądrowe są obiektami o bardzo złożonej budowie a zjawiska fizyczne zachodzące w ich instalacjach procesowych mają nieliniową i niestacjonarną naturę. Aby skutecznie i wydajnie sterować tego typu obiektami/instalacjami w szerokim zakresie zmian ich punktu pracy wymagane jest zastosowanie odpowiednich algorytmów sterowania. Stosowanie pojedynczych regulatorów z nastawami dobraćnymi dla nominalnych warunków pracy jest niewystarczające. W artykule przedstawiona została synteza wieloobszarowego regulatora rozmytego z lokalnymi regulatorami PID, który umożliwi efektywne sterowanie obiektem nieliniowym i niestacjonarnym w warunkach zmienności punktu pracy. W przypadku elektrowni jądrowej z reaktorem typu PWR, rozważany wieloobszarowy regulator rozmyty został zastosowany do sterowania mocą cieplną wytwarzaną przez reaktor, który jest głównym elementem obiegu pierwotnego tej elektrowni. Sterowanie mocą reaktora jądrowego odbywa się poprzez zmianę położenia kaset regulacyjnych w rdzeniu reaktora, zawierających w swojej konstrukcji materiały dobrze pochłaniające neutrony. Prowadzi to do zmiany warunków zachodzenia łańcuchowej reakcji rozszczepienia, zmiany mierzonej tzw. reaktywnością rdzenia i w konsekwencji do zmiany generowanej mocy cieplnej.

Struktura rozważanego układu regulacji została przedstawiona na rys. 1.

**Streszczenie**

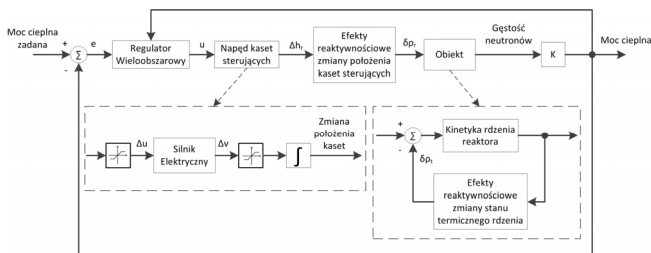
W artykule przedstawiono wieloobszarowy regulator rozmyty z lokalnymi regulatorami PID dla sterowania mocą reaktora jądrowego typu PWR. Wykorzystano model matematyczny o parametrach skupionych reaktora PWR obejmujący procesy generacji i wymiany ciepła oraz efektów reaktywnościowych. Nastawy lokalnych regulatorów PID zostały dobrane w sposób optymalny, minimalizując całkowity wskaźnik jakości ISE. Na przykładzie pokazano że zastosowane rozwiązanie może poprawić jakość pracy układu sterowania.

**Słowa kluczowe:** wieloobszarowy regulator rozmyty z lokalnymi regulatorami PID, reaktor jądrowy PWR, sterowanie, modelowanie matematyczne.

**Multi-regional fuzzy PID control of nuclear reactor power****Abstract**

In the paper synthesis of a multi-regional fuzzy controller with local PID controllers for control of thermal power of the PWR type nuclear reactor is presented. It was assumed that the nuclear reactor worked in a wide range of change of the operating point. Lumped parameter models of the thermal power generation and heat exchange were used. Due to nonlinearities of the controlled plant the proposed controller was composed of local PID controllers. A control signal from the controller was based on the Takagi-Sugeno fuzzy logic and it was built according to basic membership functions. This enabled the control of the nuclear reactor power in a wide range. A PWR nuclear reactor model - well known from the literature - consisted of the heat generation model, the thermo-hydraulics model and the reactivity effects model [1]. It was used for synthesis and analysis of the designed controller. The parameters of local PID controllers were optimally selected using the integral square error quality index. Tests and verification of the designed controller were performed using the Matlab/Simulink fast prototyping software. The results show that the designed controller is more effective in controlling the nuclear reactor power than a conventional classic PID controller.

**Keywords:** multi-regional fuzzy controller with local PID controllers, PWR nuclear reactor, control, mathematical modeling.



Rys. 1. Struktura układu regulacji  
Fig. 1. Control system structure

Nastawy każdego z lokalnych regulatorów PID dobrane są optymalnie w oparciu o minimalizację całkowitego kryterium jakości ISE – całka z kwadratu uchybu dla wybranych kilku poziomów mocy. Dla celów analizy i syntezy regulatora wykorzystano punktowy model matematyczny reaktora jądrowego typu PWR obejmujący procesy generacji i wymiany ciepła oraz efektów reaktyw-

nościowych, które opisano odpowiednio w rozdziałach 2 i 3. Model matematyczny urządzenia wykonawczego uwzględnionego w strukturze rozważanego układu sterowania przedstawiono w rozdziale 4. W rozdziałach 5 i 6 przedstawiono syntezę wieloobszarowego regulatora rozmytego z lokalnymi regulatorami PID. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono w rozdziale 7. Natomiast w rozdziale 8 zaprezentowano krótkie podsumowanie.

## 2. Model generacji i wymiany ciepła

Dynamikę szybkozmiennych procesów reaktora rozważaną dla długich horyzontów czasowych przedstawia się za pomocą nieliniowych równań różniczkowych ze zmieniającymi się parametrami [1]. Parametry te są funkcjami odpowiednich wielkości charakteryzujących środowisko i stan rdzenia reaktora np. skład izotopowy rdzenia, wytworzona energia cieplna [1, 2]. Dla krótkich horyzontów czasowych, przy rozważaniu jedynie szybkich procesów zachodzących w rdzeniu, zmienność parametrów wynikającą z przebiegu procesów wolnozmiennych można zaniedbać. Z tego powodu rozważany model nie uwzględnia procesów wolnozmiennych, takich jak zatrucie i wypalanie paliwa. Można je pominąć gdyż powodowane ich zachodzeniem zmiany reaktywności ujawniają się dopiero po zaniku przebiegów przejściowych procesów szybkozmiennych związanych z kinetyką neutronów (generacją mocy), wymianą ciepła, oraz temperaturowymi zmianami reaktywności. Skala czasowa procesów wolnozmiennych wynosi od kilku godzin do kilku dni, zaś szybkozmiennych ułamki sekund do kilkunastu minut [2]. Rdzeń reaktora traktowany jest, jako punkt materialny (nie rozpatruje się rozkładu przestrzennego wartości zmiennych i parametrów). Reaktory PWR są reaktorami, w których w łańcuchowej reakcji rozszczepienia uczestniczą neutrony natychmiastowe, powstające w akcie rozszczepienia jądra izotopu paliwowego i neutrony opóźnione, emitowane w akcie rozpadów promieniotwórczych produktów wcześniejszego rozszczepienia (prekursorów). W artykule wykorzystano model punktowy kinetyki neutronów z sześcioma grupami prekursorów neutronów opóźnionych (7-8) wraz z modelem cieplno-hydraulicznym (10-14) – stanowią one rozważany w artykule model generacji i wymiany ciepła w reaktorze typu PWR.

Model punktowy kinetyki neutronów z sześcioma grupami prekursorów neutronów opóźnionych, przy założeniu utrzymywania stanu tych procesów blisko stanu krytycznego równowagi ( $\rho=0$ ,  $n \neq 0$ ), przedstawia się w następującej ogólnej postaci [1, 2]:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t), \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i=1, \dots, 6, \quad (2)$$

gdzie:  $n$  - średnia gęstość neutronów termicznych,  $C_i$  - gęstość jąder prekursorów  $i$ -tej grupy neutronów opóźnionych,  $\rho$  - reaktywność,  $\beta$  - udział neutronów opóźnionych pochodzących z jednego rozszczepienia w liczbie wszystkich neutronów powstających w tym procesie,  $\beta_i$  - udział  $i$ -tej grupy neutronów opóźnionych pochodzących z jednego rozszczepienia w liczbie wszystkich neutronów powstających w tym procesie,  $\Lambda$  - efektywny czas życia neutronów natychmiastowych [s],  $\lambda_i$  - stała rozpadu jąder prekursorów dla  $i$ -tej grupy neutronów opóźnionych [ $s^{-1}$ ].

Model kinetyki (1-2) poddaje się normalizacji względem stanu ustalonego gęstości neutronów odpowiadającego mocy cieplnej reaktora na poziomie 100%, wykorzystując następujące podstawienia:

$$n(t) = n_{100} n_r(t), \quad (3)$$

$$C_i = C_{i100} c_{ri}(t), \quad (4)$$

$$C_{i100} = \frac{\beta_i n_{100}}{\Lambda \lambda_i}, \quad (5)$$

$$\rho(t) = \delta\rho, \quad (6)$$

gdzie:  $n_{100}$  - średnia gęstość neutronów termicznych w stanie ustalonym,  $C_{i100}$  - średnia gęstość jąder prekursorów dla  $i$ -tej grupy neutronów opóźnionych w stanie ustalonym,  $n_r$  - względna gęstość neutronów termicznych,  $c_{ri}$  - względna gęstość prekursorów neutronów opóźnionych  $i$ -tej grupy,  $\delta\rho$  - reaktywność.

Prowadzi to do następującej, znormalizowanej postaci modelu kinetyki [1]:

$$\frac{dn_r(t)}{dt} = \frac{\delta\rho - \beta}{\Lambda} n_r(t) + \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^6 \beta_i c_{ri}, \quad (7)$$

$$\frac{dc_{ri}(t)}{dt} = \lambda_i n_r(t) - \lambda_i c_{ri}(t), \quad i=1, \dots, 6, \quad (8)$$

Wartości poszczególnych parametrów znormalizowanego modelu kinetyki (7-8) zestawiono w tab. 1.

W modelu przyjęto, że reaktor znajduje się w połowie cyklu paliwowego (okres czasu przebywania paliwa w reaktorze jądrowym) ze stężeniem ksenonu w stanie równowagi [1].

Tab. 1. Parametry sześciu grup neutronów opóźnionych dla środka kampanii paliwowej

Tab. 1. Parameters of six groups of delayed neutrons in the middle of the fuel campaign

i	$\beta_i$	$\lambda_i$
1	0,0001745	0,01255
2	0,001257	0,0307
3	0,0011405	0,1165
4	0,0023495	0,3125
5	0,000821	1,1900
6	0,0002765	3,15
$\beta=0,006019$ ; $\lambda=0,150$ ; $A=0,00002$		

Wykorzystując znormalizowany model kinetyki (7-8), moc cieplną reaktora można wyrazić za pomocą następującego równania [3]:

$$P_a(t) = P_{a100} n_r(t), \quad (9)$$

gdzie:  $P_a(t)$  - moc cieplna [ $MW_{th}$ ],  $P_{a100}$  - moc w stanie ustalonym [ $MW_{th}$ ].

Model cieplno-hydrauliczny będący kolejnym elementem modelu generacji i wymiany ciepła, przedstawia się w następującej postaci [3]:

$$P_c(t) = \Omega(T_f - T_c), \quad (10)$$

$$P_e(t) = M(T_l - T_e), \quad (11)$$

$$T_c = \frac{T_l + T_e}{2}, \quad (12)$$

gdzie:  $\Omega$  - współczynnik przewodności cieplnej pomiędzy paliwem a chłodziwem [ $MW/^\circ C$ ],  $M$  - przepływ masowy pomnożony przez pojemność cieplną chłodziwa [ $MW/^\circ C$ ],  $T_f$  - średnia temperatura paliwa jądrowego [ $^\circ C$ ],  $T_c$  - średnia temperatura chłodziwa reaktora [ $^\circ C$ ],  $T_l$  - temperatura chłodziwa opuszczającego reaktor,  $T_e$  - temperatura chłodziwa wpływającego do reaktora.

Równania (10-12) przedstawiają odpowiednio przepływ ciepła z paliwa do chłodziwa  $P_c(t)$  oraz ciepło unoszone z rdzenia reaktora przez chłodziwo  $P_e(t)$ . Na ich podstawie można zapisać równania różniczkowe o parametrach skupionych określające średnią temperaturę paliwa oraz chłodziwa w następującej formie [3]:

$$f_f P_a(t) = \mu_f \frac{dT_f(t)}{dt} + P_c(t), \quad (13)$$

$$(1 - f_f) P_a(t) + P_c(t) = \mu_c \frac{dT_l}{dt} + P_e(t), \quad (14)$$

gdzie:  $f_f$  - współczynnik określający udział mocy generowanej w paliwie jądrowym do całkowitej mocy generowanej w objętości rdzenia reaktora,  $\mu_f$  - pojemność cieplna paliwa jądrowego [MWs/°C],  $\mu_c$  - pojemność cieplna chłodziwa reaktora [MWs/°C].

Typowe wartości parametrów oraz nominalne wartości zmiennych występujących w równaniach (9-14) odpowiadające pracy reaktora z mocą znamionową (100% mocy projektowej reaktora) dla reaktora jądrowego typu PWR rozważanego w artykule i znajdującego się w połowie cyklu paliwowego zestawiono w tab. 2.

Tab. 2. Parametry typowego reaktora PWR w środku kampanii paliwowej  
Tab. 2. Parameters of typical PWR reactor in the middle of the fuel campaign

$\alpha_r=0,0145$	$\mu_f=26,3$ [MWs/°C]	$^*T_{c0}=302,2$ [°C]	$^*n_{r0}=1$
$f_f=0,98$	$T_e=290$ [°C]	$^*T_{f0}=673,8$ [°C]	
$^*T_{l0}=314,4$ [°C]	$^*P_{a0}=2500$ [MW <sub>th</sub> ]	$^*c_{ri}=1 \quad i=1, \dots, 6$	

Wartości zmiennych oznaczone symbolem (\*) w tab. 2 są dalej warunkami początkowymi dla modelu kinetyki (7-9) oraz dla modelu ciepłno hydraulicznego (10-14).

Wartości temperatur  $T_{c0}$ ,  $T_{f0}$  oraz parametr  $\alpha_r$  (17-18) są też zmiennymi i parametrami modelu efektów reaktywnościowych, który przedstawiony został w następnym rozdziale. Wartości początkowe temperatur  $T_{c0}$ ,  $T_{f0}$  można otrzymać z następujących zależności [1]:

$$T_{c0} = \frac{P_{a0}}{2M} + T_e, \quad (15)$$

$$T_{f0} = \frac{f_f P_{a0}}{\Omega} + T_{c0}, \quad (16)$$

### 3. Model efektów reaktywnościowych

Rozważając dynamikę generacji i wymiany ciepła w reaktorze jądrowym dla krótkich horyzontów czasowych w bilansie reaktywności  $\delta\rho$  (7) wystarczy uwzględnić następujące składniki: efekt reaktywnościowy związany ze zmianą położenia kaset sterujących w stosunku do ich położenia odpowiadającego stanowi nominalnemu  $\delta\rho_r$ , oraz efekty reaktywnościowe temperatur chłodziwa  $\delta\rho_c$  i paliwa  $\delta\rho_f$  związane z odchyleniami tych temperatur od stanu nominalnego. Całościowy model efektów reaktywnościowych można dla krótkich horyzontów czasowych przedstawić w następującej ogólnej postaci [1]:

$$\delta\rho = \delta\rho_r + \delta\rho_c + \delta\rho_f = \alpha_r(h_r - h_{r0}) + \alpha_c(T_c - T_{c0}) + \alpha_f(T_f - T_{f0}), \quad (17)$$

gdzie:  $\alpha_r$  - współczynnik reaktywnościowy od zmiany położenia kaset sterujących,  $\alpha_c$  [1/°C] - współczynnik reaktywnościowy od zmiany temperatury chłodziwa,  $\alpha_f$  [1/°C] - współczynnik reaktywnościowy od zmiany temperatury paliwa,  $h_{r0}$  - położenie kaset w stanie nominalnym (100% mocy reaktora),  $T_{c0}$  - temperatura

chłodziwa reaktora w stanie nominalnym [°C],  $T_{f0}$  - temperatura paliwa jądrowego w stanie nominalnym [°C].

Przebieg efektu reaktywnościowego  $\delta\rho_r$  w czasie można opisać za pomocą równania różniczkowego [1]:

$$\frac{d\delta\rho_r}{dt} = \frac{d\delta\rho_r}{dh_r} \cdot \frac{dh_r}{dt} = \alpha_r \cdot \frac{dh_r}{dt} = \alpha_r \cdot \dot{h}_r(t); \quad \delta\rho_r(0) = 0, \quad (18)$$

Położenie kaset sterujących wyrażane jest w artykule w jednostkach względnych licząc od górnej krawędzi rdzenia, zatem:

$$0 < h_r < 1, \quad (19)$$

Również wartość  $h_{r0}$  spełnia warunek (19).

Sterowanie mocą reaktora realizowane jest na dwa sposoby, charakteryzujące się różną dynamiką układów wykonawczych [2]. Pierwszy sposób - sterowanie przez zmianę stężenia kwasu borowego w chłodziwie reaktora jest sposobem o powolnej dynamice i nie będzie wykorzystywany z omówionych wcześniej powodów w artykule. Drugi sposób - sterowanie przez zmianę położenia kaset sterujących z pochłaniaczami neutronów w rdzeniu jest sposobem o szybszej dynamice i będzie wykorzystany w artykule. Podczas pracy reaktora jądrowego z mocą nominalną, pręty regulacyjne zagłębione są w rdzeń reaktora na pewną głębokość.

Jak wcześniej wspomniano, w przedstawianych w artykule wynikach badań przyjęto, że reaktor znajduje się w połowie cyklu paliwowego. Reaktor jest obiektem niestacjonarnym. Charakteryzujące jego dynamikę współczynniki zależą od czasu, ale też od aktualnego stanu. Przykładowe wartości współczynników reaktywnościowych dla trzech różnych okresów kampanii paliwowej (początek, środek, koniec) oraz dla mocy reaktora na poziomie 10% i 100% przedstawiono w tab. 3.

Tab. 3. Współczynniki reaktywnościowe od temperatury chłodziwa i paliwa dla 10% i 100% mocy reaktora i trzech różnych okresów kampanii paliwowej  
Tab. 3. Reactivity temperature coefficients of the fuel and coolant for 10% and 100% of the reactor power for three different periods of the fuel campaign

	początek		środek		koniec	
	10%	100%	10%	100%	10%	100%
$\alpha_c (10^{-5})$	-2,50	-4,71	-17,7	-21,3	-41,9	-47,4
$\alpha_f (10^{-5})$	-3,86	-3,06	-4,14	-3,24	-4,42	-3,43

Zależność od stanu - względnej gęstości neutronów  $n_r$ , parametrów modelu podają zależności podane niżej:

$$\alpha_c(n_r) = (-4n_r - 17,3) \cdot 10^{-5} \quad 1/^\circ\text{C}, \quad (20)$$

$$\alpha_f(n_r) = (n_r - 4,24) \cdot 10^{-5} \quad 1/^\circ\text{C}, \quad (21)$$

$$\Omega(n_r) = \left( \frac{5}{3}n_r + 4,933 \right) \quad \text{MWs}/^\circ\text{C}, \quad (22)$$

$$\mu_c(n_r) = \left( \frac{160}{9}n_r + 54,022 \right) \quad \text{MWs}/^\circ\text{C}, \quad (23)$$

$$M(n_r) = (28n_r + 74) \quad \text{MWs}/^\circ\text{C}, \quad (24)$$

### 4. Model urządzenia wykonawczego

Zwykle do zmiany położenia kaset sterujących w rdzeniu reaktora jądrowego wykorzystuje się silniki elektryczne [2]. Prosty model takiego elementu wykonawczego, który został uwzględnio-

ny w rozważanym układzie sterowania (rys. 1), dany jest w postaci równania [1, 4]:

$$\frac{dv_r(t)}{dt} = 0,05u_r(t) - 6,25v_r(t), \quad (25)$$

gdzie:  $u_r$  - sygnał sterujący z regulatora,  $v_r$  - prędkość liniowa kaset sterujących.

Każde fizyczne urządzenie posiada pewne ograniczenia, dlatego też w rozważanym układzie sterowania również je uwzględniono. Są one związane z wejściem oraz wyjściem zastosowanego urządzenia wykonawczego. Jako ograniczenie wejścia przyjęto przedział zmian sygnału wejściowego w zakresie od -10 do +10 [V], natomiast jako ograniczenie wyjścia przyjęto przedział zmian sygnału wyjściowego w zakresie od -0,08 do +0,08 [m/s] [1, 4].

## 5. Linearyzacja obszarowa i wybór podobszarów regulacyjnych

Ze względu na nieliniowość dynamiki obiektu sterowania jakim jest reaktor jądrowy, model reaktora zlinearyzowano w sześciu, wybranych a priori, punktach pracy stanowiących odpowiednio 10%, 20%, 40%, 60%, 80% i 100% nominalnej mocy cieplnej reaktora.

Poszczególne zlinearyzowane modele można zatem przedstawić w postaci transmitancji przyrostowych:

$$\Delta G_n(s) = \frac{\Delta L_n(s)}{\Delta M_n(s)} = \frac{a_{n,8}s^8 + a_{n,7}s^7 + \dots + a_{n,1}s + a_{n,0}}{s^{10} + b_{n,9}s^9 + \dots + b_{n,1}s + b_{n,0}}, \quad (26)$$

gdzie  $n \in \{10\%, 20\%, 40\%, 60\%, 80\%, 100\%\}$ . Natomiast wartości poszczególnych parametrów występujących w wielomianach  $\Delta L_n(s)$  i  $\Delta M_n(s)$  zestawiono w tab. 4 i tab. 5.

Wejściem  $\Delta L_n(s)$  do modelu jest zmiana położenia (prędkość) kaset sterujących  $\Delta h_r$ , a wyjściem  $\Delta M_n(s)$  - względna gęstość neutronów termicznych  $n_r$ .

Tab. 4. Parametry transmitancji modeli liniowych - licznik  $\Delta L_n(s)$

Tab. 4. Parameters of linear models transfer functions – nominator  $\Delta L_n(s)$

	10%	20%	40%	60%	80%	100%
$a_8$	72,5	145	290	435	580	725
$a_7$	466	933,9	1875	2822	3775	4734
$a_6$	1008	2025	4090	6190	8326	10490
$a_5$	924,8	1867	3803	5803	7867	9991
$a_4$	364,6	741,3	1530	2366	3248	4174
$a_3$	64,6	132,5	278,1	436,7	608,2	792,6
$a_2$	4,936	10,19	21,67	34,44	48,48	63,81
$a_1$	0,1335	0,2766	0,5917	0,945	1,337	1,767
$a_0$	0,001017	0,002111	0,004525	0,007242	0,01026	0,01359

Tab. 5. Parametry transmitancji modeli liniowych – mianownik  $\Delta M_n(s)$

Tab. 5. Parameters of linear models transfer functions – denominator  $\Delta M_n(s)$

	10%	20%	40%	60%	80%	100%
$b_9$	322,5	332,7	342,8	340,9	328,6	307,5
$b_8$	1927	2013	2114	2130	2073	1953
$b_7$	3849	4119	4483	4637	4605	4413
$b_6$	3208	3600	4186	4534	4670	4620
$b_5$	1132	1396	1819	2116	2298	2377
$b_4$	184,9	256,4	374,7	462,8	523,4	559
$b_3$	12,59	19,52	31,1	39,88	46,12	50,04
$b_2$	0,2792	0,4829	0,8238	1,083	1,268	1,385
$b_1$	0,001803	0,003401	0,006074	0,008107	0,009555	0,01047

Wartości zmiennych stanu i wymuszenia w postaci wartości efektu reaktywnościowego od zmiany położenia kaset sterujących w każdym z rozważanych punktów pracy  $n$  zestawiono w tab. 6.

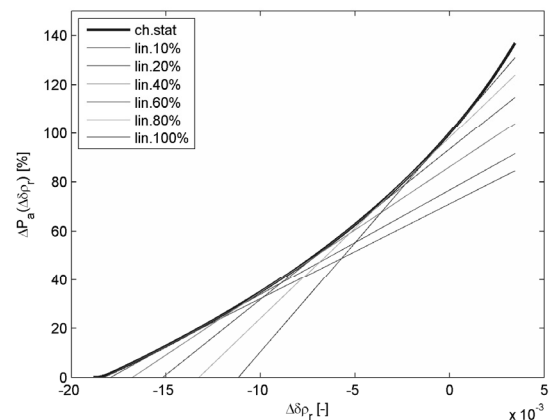
Tab. 6. Stany modelu reaktora w odpowiednich punktach pracy

Tab. 6. States of the nuclear reactor model in different operating points

n	100%	80%	60%	40%	20%	10%
$n_r$	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
$c_i^*$	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
$T_f$	673,8	613,2	546	470,9	386,2	339,7
$T_l$	314,4	310,7	306,5	301,7	296,3	293,3
$\delta\rho_r$	0	-0,002461	-0,005427	-0,008989	-0,01326	-0,01571

\*  $c_i$  dla  $i = 1, \dots, 6$

W celu wyznaczenia obszarów regulacyjnych posłużono się zewnętrzną charakterystyką statyczną  $P_a(\delta\rho_r)$  - zob. rys. 2. Przedstawia ona zależność mocy reaktora od efektów reaktywnościowych związanych ze zmianą położenia kaset sterujących w rdzeniu reaktora. Na rys. 2 przedstawiono również zlinearyzowane zewnętrzne charakterystyki statyczne  $\Delta P_a(\Delta\delta\rho_r)$  dla wymienionych wcześniej sześciu punktów pracy  $n$ .



Rys. 2. Charakterystyka statyczna modelu reaktora i charakterystyki zlinearyzowane

Fig. 2. Static characteristics of the nuclear reactor model with linear equivalents

Na ich podstawie wybrano a priori następujące podobszary regulacyjne mocy reaktora: I obszar <0%; 20%), II obszar <10%; 40%), III obszar <20%; 60%), IV obszar <40%; 80%), V obszar <60%; 100%), VI obszar <80%; +∞).

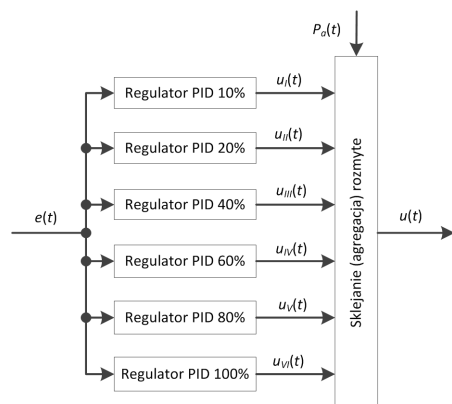
## 6. Zasada strojenia i sklejania (agregacji) sterowań lokalnych regulatorów PID

Wykorzystując przedstawione w poprzednim rozdziale modele zlinearyzowane w sześciu kolejnych punktach pracy reaktora, dobrano optymalne wartości parametrów dla sześciu lokalnych regulatorów PID przeznaczonych do pracy w odpowiednich podobszarach regulacji (od I do VI). Dobór nastaw dla tych regulatorów został przeprowadzony w sposób optymalny minimalizując całkowity wskaźnik jakości z całki kwadratu uchybu (minimalizacja „energii” związanej z realizacją trajektorii wartości zadanej). Parametry poszczególnych, obszarowych regulatorów PID otrzymane podczas rozwiązania odpowiednich zadań optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu SQP (ang. Sequential Quadratic Programming) zestawiono w tab. 7.

Tab. 7. Nastawy parametrów liniowych regulatorów PID dla modelu reaktora  
 Tab. 7. Linear PID regulator parameters for the reactor model

Podobszar regulacji	I	II	III	IV	V	VI
$K_p$	50	50	50	50	50	50
$K_i$	0	0,0301	17,9393	24,0586	16,2507	19,4624
$K_d$	1,5	1,5	1,4991	1,4988	1,4992	1,499

Następnie wykorzystując technikę sklejania rozmytego Takagi-Sugeno [5], opracowano wieloobszarowy regulator rozmyty z lokalnymi regulatorami PID. Jego strukturę przedstawiono na rys. 3.



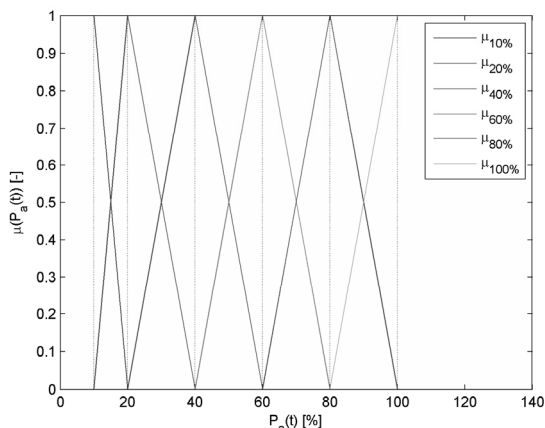
Rys. 3. Struktura wieloobszarowego regulatora rozmytego z lokalnymi regulatorami PID

Fig. 3. Structure of the multi-region fuzzy controller with local PID controllers

Każdy z lokalnych regulatorów PID wypracowuje odpowiedni sygnał sterujący, który jest składnikiem średniej ważonej opisanej następującym równaniem:

$$u(t) = \frac{\sum_{m=1}^{VI} \mu_m(P_a(t)) \cdot u_m(t)}{\sum_{m=1}^{VI} \mu_m(P_a(t))}, \quad (27)$$

gdzie:  $u(t)$  [V] - sygnał sterujący (wyjściowy) z wieloobszarowego regulatora rozmytego,  $m$  – podobszar regulacyjny mocy reaktora  $\{I, \dots, VI\}$ ,  $u_m(t)$  [V] - sygnał sterujący z obszarowego regulatora PID,  $\mu_m(\cdot)$  - waga związana z odpowiednią funkcją przynależności dla danego podobszaru regulacyjnego,  $P_a(t)$  [-] - moc reaktora.

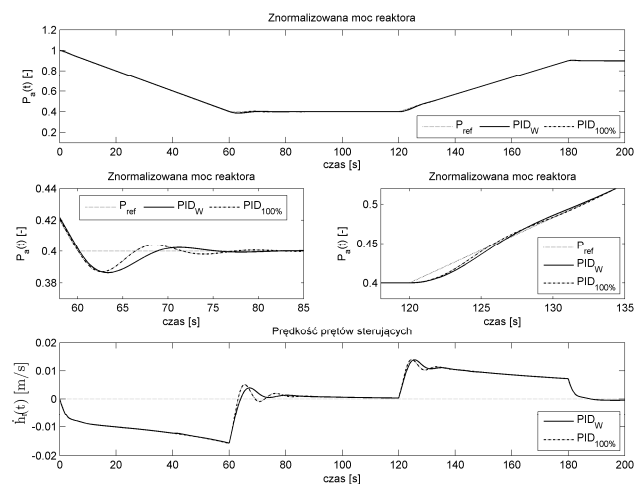


Rys. 4. Funkcje przynależności wieloobszarowego regulatora rozmytego  
 Fig. 4. Membership functions of the multi-regional fuzzy controller

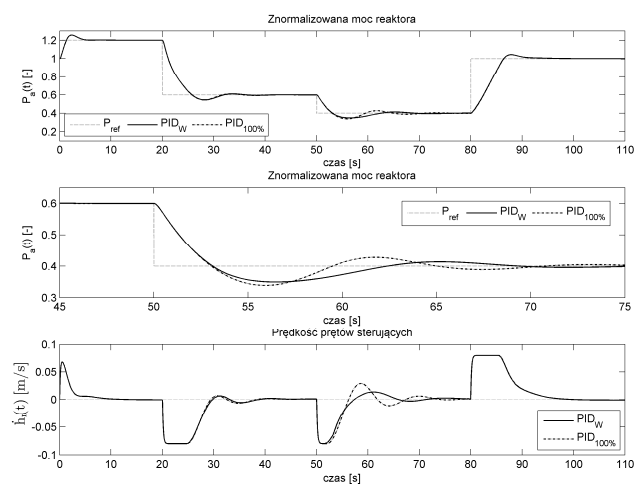
Odpowiednie wagi  $\mu_m(\cdot)$  obliczane są na podstawie funkcji przynależności oraz aktualnego poziomu mocy reaktora. Zbiór rozmyty, na którym opisane są funkcje przynależności spełnia warunek podziału jedności. Rys. 4 przedstawia funkcje przynależności wykorzystane w zaproponowanym wieloobszarowym regulatorze rozmytym. Są to funkcje trójkątne oraz trapezoidalne które w punktach linearyzacji modelu reaktora oraz w przedziałach mocy reaktora mniejszej od 10% i większej od 100% przyjmują wagę 1.

### 7. Symulacyjne badania testowe

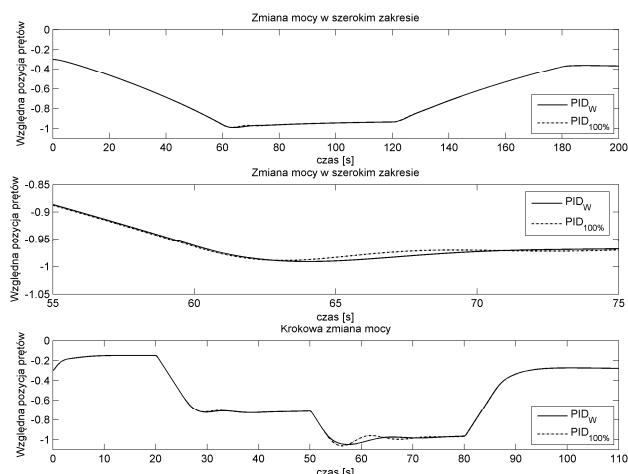
Wszystkie symulacje komputerowe zostały przeprowadzone w środowisku szybkiego prototypowania Matlab/Simulink w wersji 2010b [6]. Efektywność zaproponowanego wieloobszarowego regulatora rozmytego została porównana z efektywnością pojedynczego regulatora PID z parametrami dobranymi optymalnie dla 100% mocy reaktora, ponieważ w większości przypadków reaktor jądrowy pracuje z takim właśnie poziomem mocy. Symulacyjne badania testowe przeprowadzono dla dwóch różnych scenariuszy zmian trajektorii wartości zadanej mocy reaktora: wolno-zmienna liniowa zmiana mocy oraz skokowa krokowa zmiana mocy. Ich rezultaty przedstawiono odpowiednio na rys. 5-7.



Rys. 5. Liniowa wolno zmienna zmiana mocy  
 Fig. 5. Slow ramp varying power change



Rys. 6. Skokowe zmiany mocy  
 Fig. 6. Stepwise power change



Rys. 7. Względna pozycja prętów sterujących  
Fig. 7. Relative position of control rods

Na rys. 5 przedstawiono realizację wolnozmienną trajektorii mocy oraz prędkości zanurzania prętów sterujących w rdzeniu reaktora. Rys. 6 przedstawia realizację trajektorii mocy zmieniającej się skokowo, tzn. skokowe zmiany poziomu mocy ze 120% na 60%, 40% i 100% w kolejnych chwilach czasu, odpowiednio 20, 50 i 80 sekunda symulacji. Natomiast na rys. 7 przedstawiono względne zmiany położenia kaset sterujących w rdzeniu reaktora dla obu rozważanych scenariuszy testowych.

Wyniki przeprowadzonych testów symulacyjnych wskazują różnice w efektywności pracy obydwu badanych regulatorów. Na rys. 5-6 można zauważyć wyraźne zmniejszenie przeregulowań oraz nieznaczne skrócenie czasu regulacji mocy cieplnej reaktora na korzyść zaproponowanego wieloobszarowego regulatora rozmytego z lokalnymi regulatorami PID. Ponadto nadąża on za zadaną trajektorią zmian mocy cieplnej poprzez zmiany prędkości przemieszczania kaset sterujących w rdzeniu reaktora z mniejszym przyspieszeniem, co jest wielce pożądane, a dodatkowo wiąże się z mniejszym wydatkiem energetycznym.

Na podstawie przedstawionych wyników symulacyjnych można stwierdzić, iż jakość działania zaproponowanego wieloobszarowego regulatora rozmytego jest lepsza od klasycznego, pojedynczego regulatora PID.

## 8. Podsumowanie

W przedstawionym artykule opisano proces syntezy oraz analizy wieloobszarowego regulatora rozmytego z lokalnymi regulatorami

rami PID dla sterowania mocą cieplną reaktora jądrowego typu PWR. W układzie sterowania uwzględniono urządzenie wykonawcze odpowiedzialne za zmianę położenia kaset sterujących w rdzeniu reaktora. Do zamodelowania części obiegu pierwotnego reaktora w celu doboru nastaw oraz badań symulacyjnych efektywności działania zaproponowanego regulatora wykorzystano znany z wielu źródeł literaturowych [1, 2, 7] model reaktora jądrowego typu PWR. Wyniki badań testowych pokazały, że bardziej złożony algorytm sterowania (wieloobszarowy regulator rozmyty) przeznaczony do sterowania obiektami nieliniowymi daje lepsze efekty pod względem jakości sterowania od jego klasycznego odpowiednika (liniowy regulator PID).

This work was supported by the National Centre for Research and Development under Strategic Research Project No. SP/J/10/176450/12. The authors wish to express their thanks for the support.

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.

## 9. Literatura

- [1] Keivan Torabi, Omid Safarzadeh, and Abolfazl Rahimi-Moghaddam: Robust Control of the PWR Core Power Using Quantitative Feedback Theory. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.58, No.1:258–266, February 2011.
- [2] Ackerman G. Praca zbiorowa pod redakcją G. Ackermanna: Eksploatacja elektrowni jądrowych. WNT Warszawa, 1987.
- [3] Chao-Chee Ku, Kwang Lee Y., Edwards R.M.: Improved Nuclear Reactor Temperature Control Using Diagonal Recurrent Neural Networks. IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 39, no. 6, December 1992.
- [4] Banavar R. N., Deshpande U. V.: Robust Controller Design for a Nuclear Power Plant Using  $H_\infty$  Optimization. IEEE Transactions on nuclear science, vol. 45, no. 2, April 1998.
- [5] Li-Xin Wang: Adaptive Fuzzy Systems and Control, Design and Stability Analysis. PTR Prentice Hall, 1994.
- [6] <http://www.mathworks.com/>
- [7] Baum G., Duzinkiewicz K., Michalak A., Wojtoń K.: Model symulacyjny podstawowych procesów dynamicznych reaktora typu WWR oparty o modele o parametrach skupionych. Raporty. Instytut Elektroenergetyki i Automatyki. Politechnika Gdańska, 1989.

otrzymano / received: 05.04.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2013

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

# Wersja elektroniczna miesięcznika PAK

Artykuły opublikowane w PAK po roku 1989 są dostępne w wersji elektronicznej m.in. w bazie artykułów PAK ([www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl)), w folderze „Archiwum numerów miesięcznika PAK”:

- pełne teksty artykułów z poprzednich lat i streszczenia artykułów najnowszych można pobrać bezpłatnie,
- pełne teksty artykułów z bieżącego roku można otrzymać za opłatą (5 PLN +1,15 PLN VAT).

