

Zastosowanie identyfikacji opartej na wnioskowaniu rozmytym do identyfikacji modeli dynamicznych na przykładzie modelu protezy POLVAD

Krzysztof Janiszowski

Instytut Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej

W pracy został przedstawiony sposób modelowania dynamicznych właściwości procesu z wykorzystaniem parametrycznych modeli rozmytych. Podejście to zostało zaprezentowane na przykładzie badania dynamiki sztucznej protezy serca POLVAD, przeprowadzonego na podstawie licznych eksperymentów testowych. We wstępie opisano badany proces i podkreślono pewne właściwości o charakterze nieciągłego działania, których występowanie ogólnie ogranicza zastosowanie opisu transmitancyjnego. Wyprowadzono podstawowe zależności do prowadzenia obliczeń parametrycznych modeli dynamicznych drogą oszacowań statystycznych dla modeli liniowych parametrycznych oraz modeli rozmytych. Przedstawiono wyniki badań optymalnego modelu liniowego i modelu rozmytego oraz przeprowadzono obszerną dyskusję uzyskanych modeli. Uzyskany opis dynamiki badanego procesu odtwarza wszystkie istotne zachowania badanego procesu w sposób całkowicie wystarczający do prowadzenia badań analizujących różne algorytmy sterowania lub regulacji, jak również umożliwia wprowadzenie np. optymalizacji pracy zaworów sterujących.

Słowa kluczowe: identyfikacja, model parametryczny, model rozmyty, sztuczne organy, szybkie prototypowanie, układ krążenia

Modelowanie dynamiki procesów staje się jednym z podstawowych sposobów badania układów w fazie tworzenia i badania prototypowych układów oraz ich sterowania. Technika ta uzyskała już swoją nazwę – *fast prototyping* – i jest podstawowym narzędziem dla projektowania nowoczesnych układów oraz badania rozwiązań alternatywnych, poprzedzających wykonanie docelowych konstrukcji. Podstawą tego podejścia jest utworzenie zbioru modeli odtwarzających zachowanie komponentów układu. Modele takie można opracowywać na drodze analitycznych rozważań lub posługiwać się techniką identyfikacji. Jakkolwiek opis uzyskany drogą identyfikacji statystycznej wykazuje pewne ograniczenia, np. nie można z jego pomocą dokonywać optymalizacji działania zespołu, którego działanie zastępuje, ale ma również określone zalety, np. w przypadku istniejącego, gotowego zespołu może bardzo wiernie modelować jego zachowanie w układzie [2]. Przykład takiego zastosowania identyfikacji (opracowanie modelu dynamiki sztucznej protezy serca POLVAD) zostanie przedstawiony w artykule.

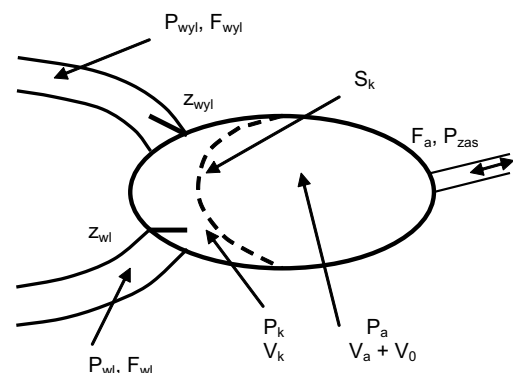
Modelowany proces – proteza POLVAD

Proteza POLVAD jest mechanicznym zespołem, który czasowo zastępuje pracę wybranej komory serca. Napęd tego urządzenia jest pneumatyczny, a zasada działania oparta na odtworzeniu cyklicznego, pulsacyjnego charakteru pompowania krwi do układu krążenia. Jej konstrukcję opracowano w Polsce i jest



Rys. 1. Modelowana proteza komory serca POLVAD

Fig. 1. Modelled heart assisting device POLVAD



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie podstawowych wielkości w badanym zespole

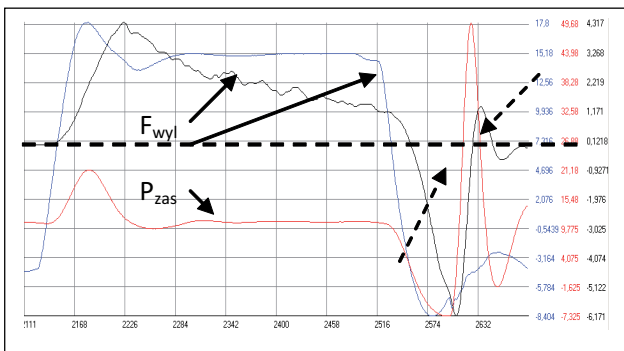
Fig. 2. Presentation of basic values in the modelled dynamic system

obecnie wykorzystywana w wielu szpitalach. Fotografia samej komory została pokazana na rys. 1.

Na rys. 2 są przedstawione oznaczenia podstawowych wielkości, umożliwiających właściwy opis tego zespołu oraz wielkości fizyczne mierzone podczas eksperymentów. Zespół POLVAD zasilany jest przepływem F_a powietrza o niskim poziomie ciśnienia P_{zas} , które mechanicznie przepycha elastyczną przeponę S_k i powoduje wyrzut krwi F_{wyl} przez otwartą zastawkę wylotową z_{wyl} , gdy ciśnienie krwi P_k jest wyższe od ciśnienia krwi w kaniuli wylotowej P_{wyl} . W przypadku cyklu zasysania krwi ciśnienie P_{wl} powinno być większe od P_k , co spowoduje otwarcie zastawki wlotowej z_{wl} i przepływ F_{wl} krwi do komory POLVAD. Oczywiście odpowiednie warunki zapewnia właściwe wystawienie ciśnieniowe od strony zawory pneumatycznego P_a , który prowadzi do ciągłej wymiany strumienia powietrza F_a . Określony sposób sterowania czasowego powinien zapewniać całkowite opróżnienie komory z krwi ($V_k=0$ zapewnia brak zalegania krwinek i zapobiega zakrzepom) oraz

odpowiednie opróżnienie komory powietrznej V_a w zależności od zadanego poziomu wspomagania protezy POLVAD, a określonej przez zadaną objętość martwą komory powietrznej V_0 . Opisany zespół zawiera bezwładnościowo działające zastawki mechaniczne, które zamykają lub otwierają określone kanały w sposób zbliżony do działania diod i tak były do tej pory modelowane [1, 5]. Zasada konstrukcji oraz działanie poszczególnych elementów wydają się proste i łatwe do zamodelowania mechanicznego, jednak obserwacje i przeprowadzone pomiary (P_{wyl} , F_{wyl} , P_{zas} , F_{wl} , P_{wl}) ujawniają zjawiska, które nie są zgodne z tak prostym podejściem do zachodzących zjawisk.

Na rys 3. przedstawiono przykładowo pomierzone (co 1 ms) zmiany ciśnień P_k , P_{zas} oraz przepływu F_{wyl} . Początek fazy wyrzutu jest zgodny z oczekiwaniami: P_{zas} przewyższa P_{wyl} (obie wielkości wyskalowane odrębnie!) i następuje wyrzut krwi $F_{wyl} > 0$ (dla lepszej rozróżnialności poziom 0 został zaznaczony dodatkową przerywaną linią).

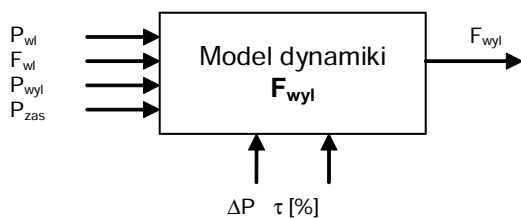


Rys. 3. Przykładowy wycinek pomiarów ciśnień: P_{zas} oraz P_{wyl} i przepływu F_{wyl} wykonany na stanowisku badawczym

Fig. 3. Measured on laboratory stand exemplary transients of pressures P_{zas} and P_{wyl} together with flow F_{wyl}

Następnie poziom ciśnienia zasilającego maleje, przepływ wylotowy F_{wyl} zmniejsza się do dużej ujemnej wartości, a następnie wzrasta (zaznaczono te fazy przerywanymi strzałkami). Oznacza to, że zastawki nie działają jak diody oraz, że należy uwzględnić dodatkowe zjawiska przepływowe związane ze spójnością strugi, dynamiką zmian ciśnień, nieznaną zmiennością bezwładnością strugi krwi itd.

W takim przypadku modelowanie zjawisk dynamicznych przestaje być prostym zadaniem, tym bardziej że badany zespół POLVAD mógł pracować w dość szerokim przedziale zmian: zadawanej średniej różnicy ciśnień, prędkości zmian (czasu cyklu) i procentowego czasu wypełnienia. W prowadzonych badaniach dobry model przepływu wylotowego był jednym z podstawowych czynników warunkujących prawidłowe zaprojektowanie całego układu sterowania, który powinien zapewniać odpowiednie warunki zasilania obwodu krążenia, przy jedno-



Rys. 4. Poszukiwany sposób opisu dynamiki komory POLVAD

Fig. 4. Representation of investigated dynamics for the device POLVAD

czesnej minimalizacji zużycia energii w celu zwiększenia czasu resursu urządzenia podczas zasilania autonomicznego. Poszukiwany model powinien uzależniać wielkość wyrzutu F_{wyl} od warunków zewnętrznych: ciśnienia wlotowego P_{wl} i przepływu wlotowego F_{wl} , ciśnienia wylotowego P_{wyl} oraz oczywiście sygnału sterującego P_{zas} (rys. 4).

Wielkości ΔP oraz τ oznaczają odpowiednio zadaną wartość różnicy ciśnień (średnie wylotowe względem średniego wlotowego) oraz czas wypełnienia cyklu – długość fazy wyrzutowej. Pozyskanie dobrego opisu, w formie podanej na rys. 4, zdecydowanie poprawiłoby jakość prowadzonych prac projektowych. Obok technik modelowych [1] zdecydowano się wykorzystać technikę identyfikacji rozmytej.

Rozmyty model dynamiki procesu

Załóżmy, że proces o przedstawionej wyżej strukturze można lokalnie przybliżyć za pomocą zestawu transmitancji operatorowych $G_{F_{wyl}V_j}(s)$, zatem dla zerowych warunków początkowych sygnał wyjściowy z powyższego procesu byłby opisany zależnością:

$$F_{wyl}(s) = G_{F_{wyl}P_{wl}}(s)P_{wl}(s) + G_{F_{wyl}F_{wl}}(s)F_{wl}(s) + G_{F_{wyl}P_{wyl}}(s)P_{wyl}(s) + G_{F_{wyl}P_{zas}}(s)P_{zas}(s) \quad (1)$$

gdzie transmitancje operatorowe $G_{F_{wyl}V_j}(s)$ są określone przez odpowiednie współczynniki oraz wartości opóźnień:

$$G_{F_{wyl}V_j}(s) = \frac{B_{V_j}(s)e^{-sT_j}}{A(s)} = \frac{[\beta_{0j} + \beta_{1j}s + \dots + \beta_{nj}s^n]e^{-sT_j}}{1 + \alpha_1s + \dots + \alpha_ns^n} \quad (2)$$

i nieznane są wartości współczynników typu α oraz β jak również wartości opóźnień T_j . Wyznaczenie wartości tych współczynników wykonywane jest najczęściej w sposób pośredni metodą identyfikacji parametrycznej, tzn. w początkowym etapie wyznaczane są transmitancje dyskretne [2]:

$$G_{F_{wyl}V_j}(z^{-1}) = \frac{[b_{0j} + b_{1j}z^{-1} + \dots + b_{nj}z^{-n}]z^{-d_j}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}} \quad (3)$$

na podstawie danych pomierzonych z określonym krokiem próbkowania Δ w taki sposób, aby modelowany sygnał wyjściowy był jak najbliższy pomierzonym wartościom $F_{wyl}(k\Delta)$, które uzależnione są od pomierzonych wartości sygnałów wejściowych $P_{wyl}(k\Delta)$, $P_{wl}(k\Delta)$, $F_{wl}(k\Delta)$, $P_{zas}(k\Delta)$ oraz nieznanymi parametrów $b_{0j} \dots a_j$:

$$\tilde{F}_{wyl}(k\Delta) = v(k\Delta)\theta \quad (4)$$

gdzie tzw. wektor wejść do modelu $v(k\Delta) \in \mathbb{R}^L$ zawiera sygnały pomierzone w odpowiednich (z uwzględnieniem opóźnień) chwilach czasowych (dla uproszczenia dalszych zapisów symbol Δ został pominięty)

$$v(k) = [P_{wyl}(k-d_1), \dots, P_{wyl}(k-d_1-n), P_{wl}(k-d_2), \dots, P_{wl}(k-d_2-n), F_{wl}(k-d_3), \dots, F_{wl}(k-d_3-n), P_{zas}(k-d_2), \dots, P_{zas}(k-d_2-n), F_{wyl}(k-1), \dots, F_{wyl}(k-n)] \quad (5)$$

a wektor kolumnowy $\theta \in \mathbb{R}^L$ zawiera wartości nieznanych współczynników transmitancji (3)

$$\theta = [b_{01}, \dots, b_{n1}, b_{02}, \dots, b_{n2}, \dots, b_{04}, \dots, b_{n4}, -a_1, \dots, -a_n]^T \quad (6)$$

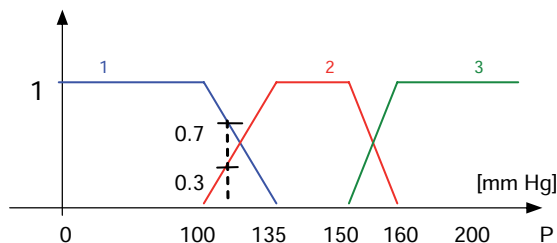
Wektor współczynników θ może być oszacowany różnymi metodami. Jedną z najprostszych jest metoda najmniejszej sumy (LS) kwadratów błędów modelu (4), która pozwala dokonać oszacowania na podstawie znajomości kolumnowego wektora pomierzonych wyjść $Y = [F_{wyj}(1), \dots, F_{wyj}(N)]^T \in \mathbb{R}^N$, gdzie N oznacza liczbę pomiarów wielkości wyjściowej, oraz macierzy $V \in \mathbb{R}^{N \times L}$ zawierającej N wierszowych wektorów wejść do modelu (4) w odpowiednich chwilach czasowych $V^T = [v(1)^T, \dots, v(N)^T]$

$$\theta_{LS} = [V^T V]^{-1} V^T Y \quad (7)$$

Zaletą tej metody jest prosty, nierekursywny algorytm obliczeń. Następnie wartości współczynników wektora θ_{LS} są przekształcane drogą aproksymacji na współczynniki transmitancji $G_{F_{wyj} V_j^s}$ (2).

Model wyznaczony w taki sposób może bardzo dokładnie określać właściwości dynamiczne badanego procesu [3, 4], ale ma właściwości lokalne i w większości przypadków wymaga wyznaczenia wielu modeli, np. dla różnych warunków zasilania ΔP lub różnych czasów wypełnienia. Jednocześnie, w przypadku gdy występują zjawiska nieciągłe, np. działanie zaworu odcinającego, wówczas modele liniowe o opisie (2) lub (3) stają się niedokładne.

Bardzo korzystne w takim przypadku jest zastosowanie modeli rozmytych [1, 2, 6], tzn. modeli o takiej samej strukturze jak w (4), ale dla których wektor współczynników θ jest zmienny i uzależniony od tzw. zmiennej r rozmywającej (lub kilku zmiennych r_1, r_2, \dots). Zmienna rozmywająca jest określona przez funkcje przynależności φ_i , (rys. 5). Na przykład, w przypadku, gdy zadana dla protezy POLVAD średnia różnica ciśnień ΔP między ciśnieniem na wylocie P_{wyj} oraz na wlocie P_{wl} będzie z obszaru pomiędzy 0 a 100 mmHg, wówczas obowiązywać będzie model θ_1 (wektor współczynników) stosowny dla małej różnicy ciśnień – wyznaczony dla partycji θ_1 . Podobnie będzie w przypadku, gdy zmienna rozmywająca ΔP przyjmie wartość 145 mmHg, wówczas należy zastosować model θ_2 wyznaczony dla średniej różnicy ciśnień ΔP , odpowiadający funkcji przynależności φ_2 .



Rys. 5. Przykładowe funkcje przynależności dla zmiennej rozmywającej będącej różnicą ΔP

Fig. 5. Exemplary membership functions for fuzzy parameterization by the signal ΔP

Natomiast w przypadku zmiennej rozmywającej ΔP równej ~ 110 mmHg funkcja przynależności φ_1 jest równa np. 0,7, a funkcja φ_2 jest równa 0,3 i wówczas model wynikowy jest kombinacją dwóch modeli $\theta = \varphi_1 \theta_1 + \varphi_2 \theta_2 = 0,7 \theta_1 + 0,3 \theta_2$.

Ogólnie można wyznaczyć model rozmyty [2] w formie kombinacji liniowej modeli wyznaczonych dla różnych przedziałów funkcji przynależności. Przykładowo, dla dwóch zmiennych (w funkcji dyskretnej chwili czasu k) rozmywających $r_1(k)$ i $r_2(k)$, o odpowiednio p i q przedziałach funkcji przynależności postać modeli będzie następująca

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{wyj}(k\Delta) &= v(k\Delta)\bar{\theta} \\ \bar{\theta} &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \varphi_i(r_1(k))\varphi_j(r_2(k))\theta_{ij} \end{aligned} \quad (8)$$

Funkcje przynależności muszą spełniać określone warunki przy zastosowaniu powyższego formalizmu

$$\varphi_i(r(k)) \geq 0 \cap \sum_i \varphi_i(r(k)) = 1 \quad (9)$$

dla dowolnej wartości zmiennej rozmywającej $r(k)$. Model taki nazywany jest modelem TSK (*Takagi-Sugeno-Kang*).

Algorytm oszacowania wektorów modeli cząstkowych θ_p przy wykorzystaniu modeli rozmytych, jest bardziej rozbudowany niż formuła (7) i wymaga jednoczesnego obliczenia wektorów dla wszystkich modeli θ_p , tzn. wyznaczenia wektora $\theta^T = [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_L^T]$ złożonego z L wektorów θ_p , który zapewni minimum wartości wskaźnika

$$I(\Theta) = \sum_{k=1}^N \left[y(k) - \sum_{i=1}^L \varphi_i(r(k)) [v(k)\theta_i] \right]^2 \Rightarrow \min_{\Theta} I(\Theta) \quad (10)$$

Powyższe zagadnienie ma rozwiązanie w innej postaci [6]

$$\begin{aligned} \hat{\Theta} &= [V^T V]^{-1} V^T Y, \\ V &= \begin{bmatrix} \varphi_1(r(1))v(1), & \dots, & \varphi_L(r(1))v(1) \\ \varphi_1(r(2))v(2), & \dots, & \varphi_L(r(2))v(2) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_1(r(N))v(N), & \dots, & \varphi_L(r(N))v(N) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N \times (M \cdot L)}, \\ Y^T &= \left[\underbrace{y(1), \dots, y(N)}_1, \dots, \underbrace{y(1), \dots, y(N)}_L \right]^T \in \mathbb{R}^{(N \cdot L)} \end{aligned} \quad (11)$$

i wymaga odwracania znacznie większych macierzy niż oszacowanie (7). Z tego powodu, przy tej formie modelu ważne jest tzw. uwarunkowanie numeryczne obliczeń, które określa poprawne wyznaczanie modeli cząstkowych. Wyznaczenie rodziny modeli cząstkowych (11) nie jest złożone obliczeniowo, a podstawową trudność stanowi właściwy dobór kształtu liczby funkcji przynależności. Istnieją również algorytmy [4, 7], które umożliwiają automatyczny dobór funkcji przynależności φ_i w taki sposób, by różnica między pomierzonym sygnałem y i jego oszacowaniem na podstawie modelu (11) była minimalna.

Podczas wyznaczania modelu rozmytego należy bardzo uważać na tzw. *poziom walidacji* poszczególnych modeli cząstkowych tzn. licznosc zbioru danych, na podstawie którego został wyznaczony określony model lokalny θ_{ij}

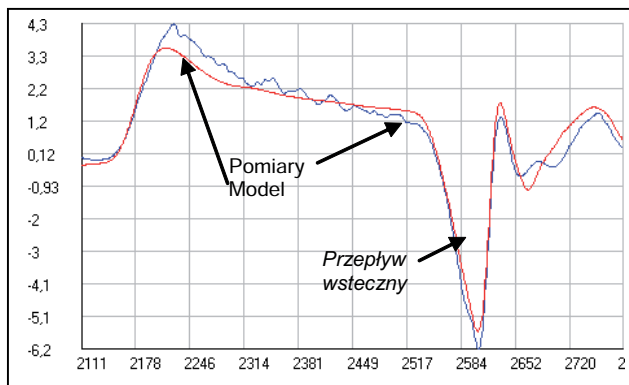
$$\kappa_{ij} = \sum_{k=1}^N \varphi_i(r_1(k))\varphi_j(r_2(k)) \quad (12)$$

Wartość ta nie może być zbyt mała, tzn. $k_{ij} \gg \mu$ (μ liczba współczynników w wektorze modelu θ_{ij}), ponieważ w przeciwnym przypadku może zostać wyznaczony model θ_{ij} o błędnie określonej dynamice, np. może być niestabilny. Zwykle przyjmuje się relację $k_{ij} \geq (10-20)\mu$ za bezpieczne spełnienie warunku dobrego określenia modelu θ_{ij} . Na poziomie walidacji należy zwracać uwagę szczególnie przy większej liczbie sygnałów rozmywających, ponieważ w takim przypadku liczba modeli cząstkowych może być znaczna.

Modele parametryczne dynamiki protezy POLVAD

Parametryczny model dynamiki, odpowiadający schematowi oddziaływań z rys. 4, został oszacowany dla danych zarejestrowanych dla zadanej różnicy ciśnień $\Delta P = 100$ mmHg. Parametry transmitancji (3) modelu (rzęd $n = 5$, opóźnienia $d_j \in <0, 30 \text{ ms}>$) zostały optymalnie dobrane w sensie minimum błędu odtwarzania sygnału przepływu wylotowego F_{wyl} . Jakość tego modelu jest przedstawiona na rys. 6, gdzie zamieszczono pomierzony i wyznaczony na podstawie modelu wycinek przebiegu wypływu F_{wyl} .

Na podstawie powyższych przebiegów można uznać, że wyznaczony model zachowuje się całkiem poprawnie, a wyznaczony średni poziom błędów ϵ , określony jako $\Sigma|\epsilon|/\Sigma|F_{wyl}|$, był równy 23,5%. Obserwowany efekt wstecznych przepływów, przedstawiony na rys. 3, który niepokoił zespół badający zjawisko, został odtworzony przez model w całkiem satysfakcjonujący sposób, zarówno pod względem amplitudy zmian, jak czasu trwania.



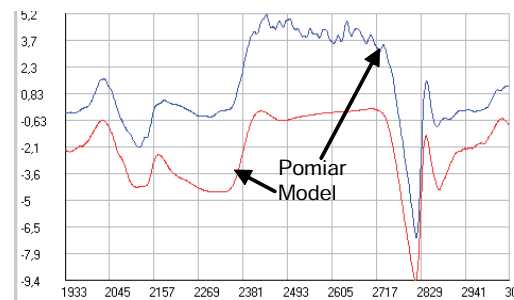
Rys. 6. Modelowany i pomierzony wycinek przebiegu przepływu F_{wyl} dla modelu wyznaczonego na podstawie sekwencji $\Delta P=100$ mmHg

Fig. 6. Measured and modeled transients of flow F_{wyl} for the model estimated for a sequence $\Delta P=100$ mmHg (appr. 800 ms)

Należy jednak pamiętać, że przedstawione wyniki modelowania (rys. 6), były uzyskane dla tej samej sekwencji danych, na podstawie których był wyznaczany model, tzn. dla zadanej spadku ciśnienia $\Delta P = 100$ mmHg. W przypadku wykorzystania tego modelu dla innej sekwencji, pomierzonej dla zadanej różnicy ciśnień $\Delta P = 135$ mmHg (rys. 7), model ten był wyraźnie błędny i wykazywał średni poziom błędów 157% (!), tzn. model odtwarzał zmiany, ale w mniejszym zakresie i na całym innym poziomie.

Taki efekt oznaczał, że można „wpasować” model do określonej sekwencji danych, ale będzie on miał charakter bardzo

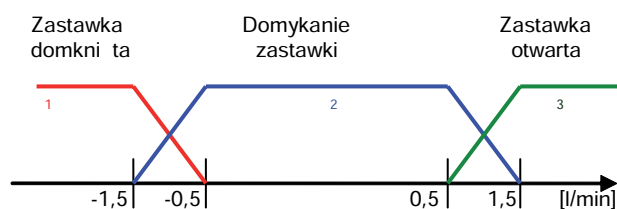
lokalny i trzeba znaleźć wiele takich modeli w celu właściwego odtwarzania sygnału F_{wyl}



Rys. 7. Modelowany i pomierzony wycinek przebiegu przepływu F_{wyl} ($\Delta P=135$ mmHg) dla modelu wyznaczonego na podstawie sekwencji $\Delta P=100$ mmHg

Fig. 7. Measured transients of the flow F_{wyl} ($\Delta P=135$ mmHg) and simulated by the model estimated for transients $\Delta P=100$ mmHg

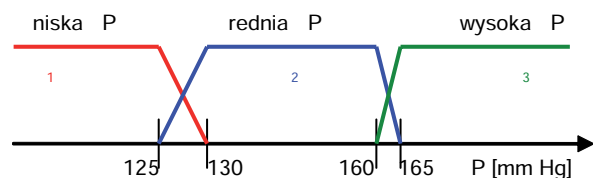
W celu właściwego odtworzenia właściwości dynamicznych postanowiono wykorzystać modele rozmyte. Jako zmienne parametryzujące wykorzystano dwa sygnały: sygnał przepływu F_{wyl} oraz sygnał zadanej różnicy ciśnień ΔP . W przypadku sygnału przepływu F_{wyl} postanowiono przeprowadzić rozmycie uzależniające właściwości modelu od stanu: przepływ dodatni (właściwy wyrzut), przepływ wsteczny (niedomknięta zastawka) oraz faza domykania zastawki, co spowodowało ustalenie funkcji przynależności jak na rys. 8.



Rys. 8. Określenie funkcji przynależności dla zmiennej rozmywającej F_{wyl}

Fig. 8. Determination of membership functions for the parameter F_{wyl}

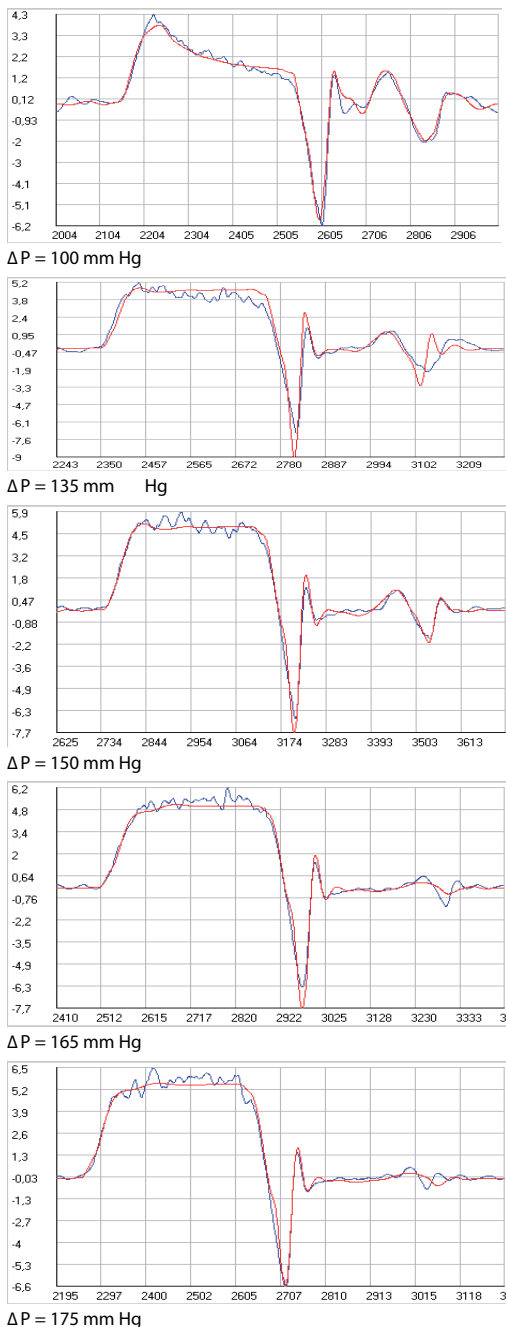
W przypadku drugiej zmiennej rozmywającej model podział na funkcje przynależności wyglądał podobnie (również trzy obszary), przy czym za niską różnicę ciśnień przyjęto wartości bliskie $\Delta P < 125$ mmHg, a za wysokie ΔP powyżej 160 mmHg (rys. 9).



Rys. 9. Funkcje przynależności dla zmiennej ΔP

Fig. 9. Membership functions for the parameter ΔP

Przy takiej parametryzacji podczas wyznaczania modelu rozmytego należało określić 9 modeli cząstkowych. Pomiarzy zostały przeprowadzone dla różnych zadanych wartości $\Delta P = 100, 135, 150, 165, 175$ mmHg. W każdym cyklu było 10 tys. pomiarów, a wyznaczane modele cząstkowe były określone na podstawie od ok. 300 do ponad 6000 pomiarów (12). W celu oszacowania wykorzystano 3 cykle: $\Delta P=100, 150,$



175 mmHg, a w celu weryfikacji dodatkowo $\Delta P=135, 165 \text{ mmHg}$. Porównawcze wycinki przebiegów zostały przedstawione na rys. 10. Można zaobserwować wyraźną zgodność przebiegów mierzonych i modelowanych. Błędy modelowania były dla sekwencji $\Delta P=135 \text{ mmHg}$, największe i wynosiły 23,3 %, a dla sekwencji $\Delta P=175 \text{ mmHg}$ tylko 10,4 %. Należy przy tym zwrócić uwagę, że występujące błędy są w większości efektem niedoskonałości techniki pomiarowej.

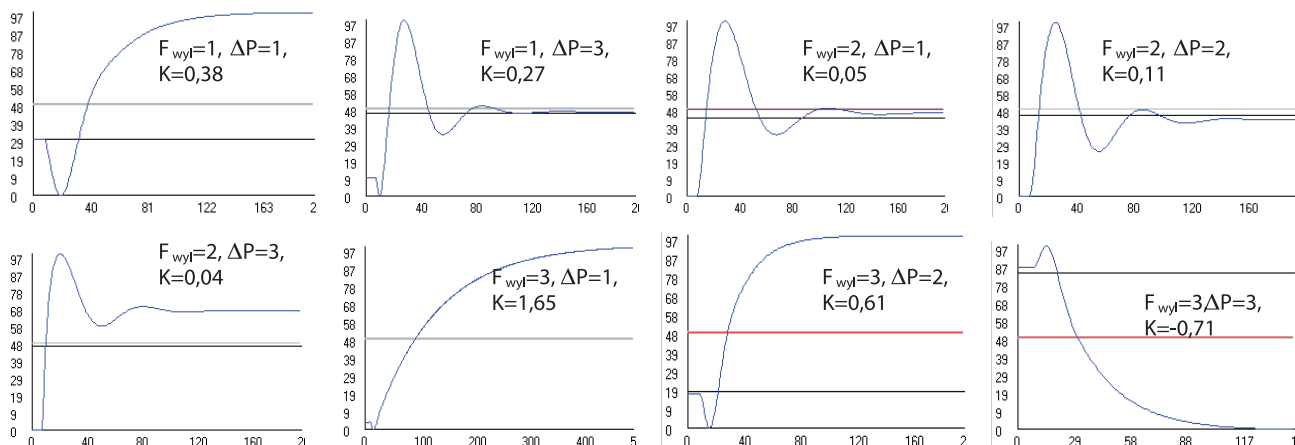
Model dobrze odtwarzał przebiegi zarówno dla danych na podstawie których był wyznaczany ($\Delta P=100, 150, 175 \text{ mmHg}$) jak i dla danych weryfikacyjnych ($\Delta P=135, 165 \text{ mmHg}$) i można go uznać za dobre odtworzenie zachowania badanego procesu – zachowania dynamicznego komory POLVAD.

W artykule nie będą dyskutowane poszczególne transmitancje modeli cząstkowych, bo jest ich dużo: 9 modeli, każdy zawiera 5 transmitancji rzędu 4. W celu zobrazowania zmienności wyznaczonych modeli przedstawione (rys. 11), odpowiedzi skokowe modeli przepływu F_{wyl} na zmianę ciśnienia P_{zas} w zależności od obszarów, dla których był wyznaczany model cząstkowy, przy czym na wykresach podano wskaźnik funkcji przynależności dla obydwu zmiennych rozmywających oraz wielkość wzmocnienia statycznego K modelu cząstkowego. Przykładowo, $F_{wyl} = 2$ i $\Delta P = 3$ oznacza model cząstkowy wyznaczony dla: $F_{wyl} \in <-0,5, 0,5>$ oraz $\Delta P > 165$.

Komentując wyniki (rys. 10) można uznać, że wyznaczony model nie obniża poziomu reakcji na pobudzenia, co dość często występuje w modelach określanych za pomocą estymatora LS, gdy są obecne zakłócenia pomiarowe, jak w rozważanym przypadku. Może być zatem wykorzystany do modelowania protezy POLVAD w różnych warunkach pracy i sprawdzania różnych, możliwych do rozważenia sposobów pobudzania. Takim krytycznym parametrem aplikacyjnym urządzeń tego typu jest szybkość zmian przepływu podczas wyrzutu (zbyt duży gradient zmian przepływu powoduje rozbijanie czerwonych krwinek).

Rys. 10. Zmierzone i modelowane wycinki przebiegów wartości wypływu z komory POLVAD za pomocą modelu rozmytego

Fig. 10. Measured and modelled (by the fuzzy model) transients of the output flow from the POLVAD chamber



Rys. 11. Odpowiedzi skokowe przepływu F_{wyl} względem wysterowania P_a dla różnych modeli cząstkowych

Fig. 11. Responses of flow F_{wyl} in respect of the step of control P_a for different partially models

Z tego powodu stosowane algorytmy sterowania oraz reakcje serwowatorów, sterujących zmianą ciśnienia P_a w części pneumatycznej protezy, są bardzo istotnym problemem. Wyznaczony model bardzo zgodnie (z pomiarami) odtwarza ten fragment mierzonych przebiegów i należy uznać, że będzie się bardzo dobrze nadawał do prowadzenia dalszych prac badawczych.

Przedstawione wybrane odpowiedzi skokowe (rys. 11) również wykazują wyraźne różnice. Należy zwrócić uwagę na zmienny współczynnik wzmocnienia K , który w przypadku ostatniego modelu cząstkowego ma wartość ujemną. Świadczy to o zmienności dynamiki w zależności od sygnałów rozmywających, jak również o potrzebie poszukiwania różnych modeli cząstkowych.

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule sposób wykorzystania metody wyznaczania modeli rozmytych do określania właściwości dynamicznych procesów, dla których nie jest znany dokładny model działania, jest bardzo efektywnym podejściem i może w znaczący sposób przyspieszać badania, upraszczać technikę modelowania i przyspieszać etap wstępnej analizy działania całości układu, który zawiera zespół lub proces zastąpiony modelem rozmytym. Jednocześnie fakt, że model wynikowy pozwala zastępować działanie procesu w szerokim zakresie zmian punktu pracy procesu, umożliwia prowadzenie obliczeń optymalizacyjnych i szybką analizę działania alternatywnych rozwiązań układu lub diagnozowania procesu.

Podziękowania

Powyższa praca była wynikiem badań sponsorowanych przez narodowy program badawczy „Polskie Sztuczne Serce”, zgodnie z umową nr 12/WK/P02/0001/SPB-PSS/2009.

Bibliografia

1. Golnik A., Fajdek B., Janiszowski K.: *Modelowanie układu krążenia z możliwością równoległego wspomaganie pracy komór serca w pakiecie programowym PExSim*. PAR 11/2010.
2. Janiszowski K.: *Identyfikacja parametryczna układów dynamicznych w przykładach*. Exit, 2002.
3. Janiszowski K., Wnuk P.: *PexSim – a novel approach to the problem of the investigation of complex dynamic systems in an industrial environment*. Problemy eksploatacji, 4/2006, s. 17–37.
4. Janiszowski K.: *Modele procesów*. „Modelowanie diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami, Implementacja w systemie Diaster”, Pr. zb. Red. J. Korbicz, J.M. Kościelny, WNT 2009.
5. Kozarski M., Ferrari G., Zielczyński K., Górczyńska K., Pałko K. J., Tokarz A., Darowski M.: *A new hybrid electro-numerical model of the left ventricle*. Computers in Biology and Medicine, vol.38, pp. 979–989, 2008.
6. Wnuk P.: *Algorytmy optymalizacji struktury rozmytych modeli*. Rozprawa doktorska, Warszawa 2004. ■

Fuzzy identification of dynamic systems used for modeling of hearth assisting device POLVAD

The aim of paper was to describe an effective approach to modelling of dynamics an artificial hearth chamber – ventricular assisting device (POLVAD). The precise model of this component is very important in proper design of supply and control system, that have to be safe and have long autonomic operation time. In the introduction a short presentation of parametric and fuzzy models was made, together with some aspects of good conditioning of numerical calculations. Next results of fuzzy identification of POLVAD were presented and discussed. Obtained model is very precise and can be used in fast prototyping mode at design of proper control.

Keywords: artificial organs, fast prototyping, fuzzy model, human circulatory system, identification, parametric model

prof. dr hab. inż. Krzysztof Janiszowski

Działalność naukowa w zakresie identyfikacji, modelowania i sterowania procesów. Autor 5 podręczników, 35 artykułów, 84 referatów i ponad 40 projektów badawczych. Obszary badań aplikacyjnych: identyfikacja procesów przemysłowych (pieca obrotowego w cementowni, pieca do ciężkiego wytopu stali, reaktorów chemicznych, pieca pirolitycznego, walczaka parowego, zespołu oczyszczalni itd.), synteza algorytmów sterowania do pneumatycznych układów pozycjonujących, hydraulicznych napędów waporowych, zespołu napędu hybrydowego o 2 stopniach swobody, oraz pakiety oprogramowania do identyfikacji układów dynamicznych (IDCAD), i modelowania, symulacji działania i sterowania procesów przemysłowych (PExSim).



e-mail: k.janisowski@mchtr.pw.edu.pl