

Alicja SIEWNICKA, Bartłomiej FAJDEK, Krzysztof JANISZOWSKI, Katarzyna CHOŁOST
 INSTYTUT AUTOMATYKI I ROBOTYKI,
 ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

Diagnostyka stanu napełnienia sztucznej komory serca POLVAD

Mgr inż. Alicja SIEWNICKA

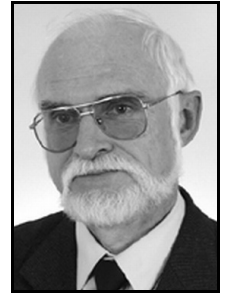
Absolwentka i doktorantka Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej zatrudniona na stanowisku asystenta w Instytucie Automatyki i Robotyki. Zainteresowania naukowe autorki obejmują zagadnienia związane z modelowaniem i sterowaniem procesów, ze szczególnym uwzględnieniem modelowania i symulacji pracy układu krążenia człowieka oraz urządzenia wspomagającego pracę serca.



e-mail: alicja.siewnicka@gmail.com

Prof. dr hab. inż. Krzysztof JANISZOWSKI

Działalność naukowa w zakresie identyfikacji, modelowania i sterowania procesów. Obszary badań aplikacyjnych: identyfikacja procesów przemysłowych, synteza algorytmów sterowania dla pneumatycznych układów pozycjonujących, hydraulicznych napędów wporowych, zespołu napędu hybrydowego o 2 stopniach swobody, oraz pakiety oprogramowania dla identyfikacji układów dynamicznych (IDCAD), i modelowania, symulacji działania i sterowania procesów przemysłowych (PEXSim).



e-mail: kjanisz@mchtr.pw.edu.pl

Mgr inż. Bartłomiej FAJDEK

Autor ukończył studia na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zainteresowania naukowe autora obejmują szereg zagadnień z dziedziny robotyki, ze szczególnym uwzględnieniem modelowania oraz symulowania manipulatorów.



e-mail: b.fajdek@mchtr.pw.edu.pl

Inż. Katarzyna CHOŁOST

Studentka piątego roku kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. W ramach pracy dyplomowej zajmowała się algorytmami wykrywania całkowitego napełnienia oraz pełnego wyrzutu krwi z urządzenia wspomagającego pracę serca (POLVAD-MEV).



e-mail: kasia.cholost@gmail.com

Streszczenie

Niniejszy artykuł zawiera opis przeprowadzonego eksperymentu identyfikacyjnego dla sztucznej komory serca POLVAD-MEV oraz opracowanych algorytmów wykrywania stanu całkowitego napełnienia oraz wyrzutu z komory krwistej tego urządzenia. Przedstawiono metody diagnostyczne bazujące na różnych sygnałach wejściowych oraz ich implementację w programie symulacyjnym PEXSim. Zawarto oraz omówiono uzyskane wyniki oraz opracowano wnioski dotyczące poszczególnych metod wyznaczania stanów granicznych napełnienia komory.

Słowa kluczowe: sztuczna komora serca, urządzenie wspomagające pracę serca, POLVAD, pełen wyrzut, całkowite napełnienie, PEXSim.

Diagnosis of the POLVAD artificial assist device filling state

Abstract

The paper presents an identification experiment for the POLVAD-MEV artificial heart and the developed detection algorithms for complete filling and full emptying the device blood chamber. In Section 1 the subject is presented and the problem of thrombus formation, as a result of incomplete range of the assist device membrane motion, is discussed. Section 2 presents the research methodology. In Subsection 2.1 the ventricle assist device construction (Fig. 1) and the test bench are described. The stand consists of a hybrid model of the circulatory system [10] with attached POLVAD device and the following measuring equipment: ultrasonic flow measurements at the inlet and outlet cannula, pressure sensors at the inlet and outlet of the blood chamber and the air pressure in pneumatic drain. In Subsection 2.2 the impact of complete filling and full ejection on the transients of the measured values is discussed (Fig. 2). Two algorithms for detection of complete filling and full ejection are presented. One of them is based on the analysis of pressure changes in the cannulas and pneumatic drain, the second one is based only on the pneumatic pressure variation. Section 3 presents the results of the diagnostic algorithm examination. The effectiveness of the proposed methods is compared. In the last section the obtained results are summarized and some proposals for further improvements are given when focusing on the development of diagnostic features based on analysis of the pneumatic pressure variation only.

Keywords: artificial heart, ventricle assist device, POLVAD, complete filling, full emptying, PEXSim.

1. Wprowadzenie

Choroby układu krążenia stanowią główną przyczynę zgonów w Polsce [1] i jedną z głównych na świecie [2]. Z tego względu dokładne poznanie procesów dotyczących układu krążenia człowieka oraz metod jego wspomagania ma kluczowe znaczenie społeczne. W celu lepszego zrozumienia procesów hemodynamicznych, w ostatnich latach powstało wiele modeli układu krążenia, zarówno ogólnego przeznaczenia [3] jak i służących do modelowania konkretnych problemów, np. szacowania wrażliwości na insulinę [4]. Jednocześnie opracowanych zostało kilka rozwiązań technicznych i konstrukcyjnych urządzeń wspomagających pracę serca [5, 6]. Są one wykorzystywane klinicznie w celu podtrzymania funkcji życiowych do czasu operacji kardiologicznych. W celach badawczych powstawać zaczęły modele matematyczne opisujące pracę protez. Pozwala to na wstępne badanie wpływu ich zastosowania na funkcjonowanie układu krążenia bez konieczności wykonywania testów na żywych organizmach.

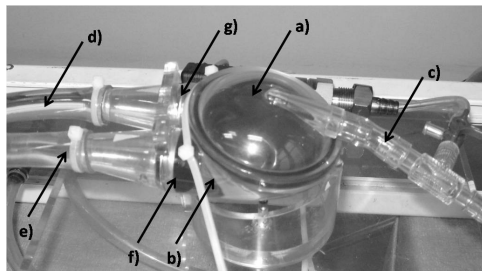
Celem naszej pracy jest opracowanie algorytmu umożliwiającego określenie, czy występuje całkowite napełnienie i pełen wyrzut z komory krwistej urządzenia. Diagnostyka stanu napełnienia, a zwłaszcza detekcja pełnego wyrzutu, ma kluczowe znaczenie w procesie wspomagania. Niepełne opróżnienie komory powoduje nieodpowiednie jej obmywanie, co sprzyja powstawaniu obszarów zastoju krwi i w efekcie tworzeniu się skrzepin [7]. Oderwanie zakrzepu od ściany komory grozi zatorem naczyń i może spowodować zgon pacjenta. Z tego względu, planowany system sterujący komory powinien zapewniać realizację zadanej wartości rzutu jednostkowego SV (ang. stroke volume), czyli objętości krwi przepompowywanej w ciągu jednego cyklu pracy, poprzez pracę z pełnym wyrzutem. Wykrywanie całkowitego napełnienia komory jest również istotne z punktu widzenia medycznego oraz stanowi cenną informację z punktu widzenia projektowania układu sterującego, który powinien zapewniać napełnianie komory w optymalnie długim czasie. Oznacza to, że zadana maksymalna wielkości rzutu jednostkowego powinna być osiągnięta bezpośrednio przed fazą wyrzutu. W innym przypadku mamy sytuację, w której krew przez pewien czas zatrzymuje się w komorze, co zwiększa ryzyko powstania skrzepu.

Detekcja powyższych zjawisk oraz momentu ich wystąpienia jest także istotna z punktu widzenia modelowania sztucznej komory serca. Warunki pracy urządzenia, w chwili osiągnięcia przez membranę jednej z pozycji skrajnych, ulegają znacznej zmianie i muszą być traktowane jako odrębne fazy pracy.

2. Metodyka badań

2.1. Eksperyment identyfikacyjny sztucznej komory serca

W celu zbadania działania komory POLVAD-MEV i zebrania niezbędnych danych doświadczalnych, przeprowadzony został szeroki eksperyment identyfikacyjny w Fundacji Rozwoju Kardiologii w Zabrze. Układ pomiarowy składał się z opracowanego w ramach programu wieloletniego „Polskie Sztuczne Serce” systemu wspomagania serca POLCAS, który jest wykorzystywany klinicznie od 1999r [8]. W skład systemu wchodziła pozaustrojowa sztuczna komora serca wraz z dedykowanym urządzeniem sterującym POLPDU-402. Badana proteza serca jest zasilana pneumatycznie pompą pulsacyjną. Składa się z dwóch komór, pneumatycznej oraz krwistej, oddzielonych membraną z tworzywa sztucznego (rys. 1). Do komory powietrznej doprowadzony jest przewód połączony z urządzeniem zasilającym, natomiast od komory krwistej odchodzą dwie kaniule wyposażone w zastawki mechaniczne zapewniające przepływ krwi wyłącznie w jednym kierunku.



Rys. 1. Pozaustrojowa komora wspomagania serca POLVAD: a) komora pneumatyczna, b) komora krwista, c) przewód pneumatyczny, d) kaniula dopływowa, e) kaniula odpływowa, g) zastawki mechaniczne

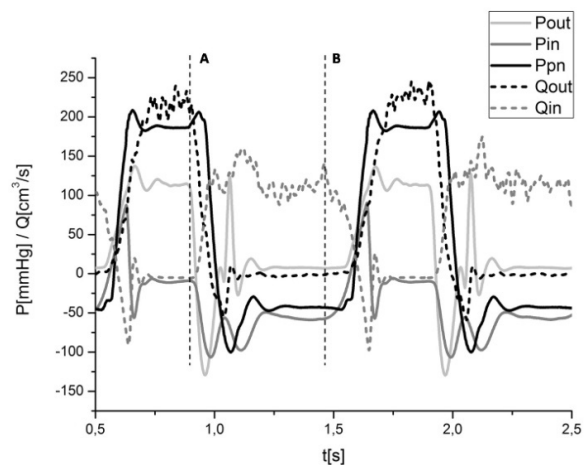
Fig. 1. Extracorporeal ventricle assist device POLVAD: a) pneumatic chamber, b) blood chamber, c) pneumatic drain, d) inlet cannula, e) outlet cannula, g) mechanical valves

W przypadku wspomagania naturalnego serca, kaniula dołotowa wprowadzana jest do przedsiionka lewej lub prawej komory, a wylotowa odpowiednio do aorty lub tętnicy płucnej. Sterowanie realizowane jest poprzez naprzemienne zadawanie w komorze powietrznej wysokiego i niskiego ciśnienia. Zapewnia to cykliczne przemieszczanie membrany powodując napełnienie i wyrzut cieczy z komory krwistej. Przebieg sygnału zasilania jest w przybliżeniu prostokątny ze współczynnikiem wypełnienia oznaczonym jako %SYS, czyli procentowy stosunek czasu trwania fazy wyrzutu do okresu całego cyklu. Pozostałymi parametrami zasilania jest wartość maksymalna i minimalna ciśnienia oraz częstość pracy komory - BPM (ang. Beats Per Minute). W trakcie badań zamiast krwi naturalnej komora pracowała na cieczy krwiopodobnej, a w celu umożliwienia wykonania eksperymentu, opisany system wspomagania podłączony był do hybrydowego modelu układu krążenia człowieka. Jest to urządzenie opracowane w Instytucie Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej im. Macieja Nałęczu składające się z matematycznego modelu układu krążenia oraz części fizycznej w postaci transformatorów impedancji [9, 10]. Umożliwiają one zamianę, obliczonych na podstawie modelu matematycznego i pomiaru ciśnień, wartości przepływów na fizyczne przepływy cieczy [11]. Gotowy układ wyposażony został w odpowiednie czujniki pomiarowe. Rejestrowane były przepływy w kaniuli dołotowej i wylotowej (Q_{in} , Q_{out}), ciśnienia w obu kaniulach (P_{in} , P_{out}) oraz w przewodzie pneumatycznym (P_{pn}). W trakcie pomiarów układ hybrydowy pracował w dwóch

różnych trybach: przy ustalonym obciążeniu na wlocie i wylocie z komory krwistej oraz w warunkach modelowania niewydolności lewej komory serca z dołączonym wspomaganie równoległym.

2.2. Rozpoznawanie pełnego wyrzutu i całkowitego napełnienia

W wyniku przeprowadzonej serii pomiarowej uzyskanych zostało około 650 zapisów dla różnych trybów pracy modelu hybrydowego i zmiennych warunków wspomaganie. Na podstawie analizy uzyskanych wyników możemy stwierdzić, że osiągnięcie pełnego wyrzutu oraz całkowitego napełnienia komory krwistej ma wpływ na przebiegi wartości hemodynamiczne panujących w komorze. Wystąpienie pełnego wyrzutu z komory możemy zaobserwować w zarejestrowanych przebiegach pomiarowych w postaci spadku wartości natężenia przepływu wyjściowego Q_{out} , co jest zgodne z oczekiwaniami, ale również w postaci gwałtownego spadku ciśnienia wyjściowego P_{out} oraz pojawienia się przepływu wejściowego Q_{in} jeszcze w fazie wysokiego ciśnienia zasilania (rys. 2).



Rys. 2. Przebiegi ciśnień: wlotowego (P_{in}), wylotowego (P_{out}), w drenie pneumatycznym (P_{pn}) oraz przepływów wylotowego (Q_{out}) oraz wlotowego (Q_{in}) przy pracy w warunkach stałego obciążenia wyjściowego. A- pełen wyrzut, B - całkowite napełnienie

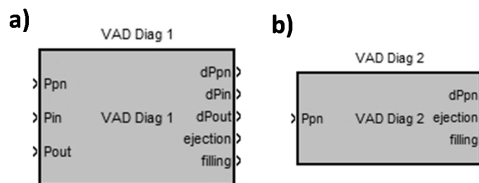
Fig. 2. Pressure waveforms: inlet (P_{in}), outlet (P_{out}), in the pneumatic drain (P_{pn}) and outlet (Q_{out}) and inlet (Q_{in}) flows under constant load output conditions. A- full ejection, B- complete filling

Najprawdopodobniej jest to spowodowane właściwościami bezwładnościowymi cieczy. W trakcie wyrzutu opuszcza ona komorę z pewną prędkością. W momencie gwałtownego zatrzymania się membrany ciecz nie jest w stanie wytracić prędkości w sposób natychmiastowy, co skutkuje spadkiem ciśnienia w kaniuli wyjściowej, a więc i w samej komorze. Osiągana jest wartość niższa niż ciśnienie w kaniuli dołotowej. Ponieważ budowa komory umożliwia otwarcie zastawki dołotowej nawet w momencie całkowitego napięcia membrany, różnica ciśnień wywołuje chwilowy dopływ krwi do komory. Jednocześnie zaobserwować można znaczący wzrost ciśnienia zasilania. Jest to najprawdopodobniej efektem napinania membrany. Ciśnienie sterujące kształtowane jest poprzez wysterowanie pneumatycznego zaworu proporcjonalnego, który łączy przewód zasilający urządzenia naprzemiennie z jednym z dwóch zbiorników: wysokiego lub niskiego ciśnienia. W zbiornikach panują w przybliżeniu stałe ciśnienia o wartościach 375mmHg i -135mmHg. Zadane wartości maksymalne i minimalne przebiegu zasilania uzyskiwane są poprzez odpowiednie wysterowanie zaworu, przy czym wykorzystywana jednostka sterująca POLPDU-402 nie zawierała układu automatycznej regulacji tych wartości. Osiągnięcie pełnego wyrzutu, powoduje blokowanie przepływu i wzrost ciśnienia P_{pn} w komorze powietrznej.

Dla całkowitego napełnienia natężenie przepływu wejściowego Q_{in} , w chwili osiągnięcia pozycji skrajnej membrany, maleje

powodując wzrost ciśnienia w kaniuli dolotowej (P_{in}) w wyniku gwałtownego zatrzymania cieczy. Następuje odbicie strugi cieczy od elastycznej membrany trwające przez czas potrzebny do zamknięcia zastawki wejściowej. W wielu przypadkach obserwowany był nawet niewielki przepływ wylotowy z komory. Dojście membrany do skrajnego położenia powoduje również spadek wartości ciśnienia zasilania (rys. 2). Na zarejestrowanych przebiegach jest on jednak znacznie mniejszy niż wzrost ciśnienia w przypadku pełnego wyrzutu i kończy się wraz z domknięciem zastawki wlotowej. W przypadku pełnego wyrzutu mamy więc do czynienia z gwałtownym spadkiem ciśnienia na wyjściu z komory, które występuje przed zmianą fazy zasilania. Całkowite napełnienie skutkuje natomiast wystąpieniem nagłego wzrostu ciśnienia na wejściu komory przed rozpoczęciem fazy wysokiego ciśnienia sterującego.

W celu automatycznego wykrycia wystąpienia tych zjawisk opracowany został algorytm, który na podstawie analizy zmian wartości sygnałów ciśnienia zasilania i ciśnień w kaniulach dolotowych wyznacza momenty wystąpienia skrajnych położenia membrany. Algorytm zaimplementowany został w postaci bloku funkcyjnego VAD Diag1 (rys. 3a) w programie symulacyjnym PExSim [12], który jest elastyczną platformą programową, opracowaną w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej, umożliwiającą modelowanie rozbudowanych układów dynamicznych. W jej skład wchodzi różnorodność bloków umożliwiających modelowanie podstawowych zależności matematycznych i logicznych, podstawowych elementów statycznych i dynamicznych oraz obsługujących operacje wejścia/wyjścia.



Rys. 3. Widok bloków umożliwiających wykrywanie wystąpienia całkowitego napełnienia i pełnego wyrzutu. Ppn – ciśnienie zasilania, Pin, Pout – ciśnienie w kaniuli wejściowej i wyjściowej, ejection/filling – wyjścia sygnałowe informujące o wystąpieniu całkowitego wyrzutu i napełnienia

Fig. 3. View of full ejection and complete filling detection blocks. Ppn – supply pressure, Pin, Pout – inlet and outlet cannula pressures, ejection/filling – output signal indicating the occurrence of full ejection and complete filling

Detekcja pełnego wyrzutu odbywa się poprzez sprawdzenie, czy pod koniec fazy opróżniania występuje wyraźny spadek ciśnienia wyjściowego, co realizowane jest poprzez porównanie, czy końcowa wartość ciśnienia wyjściowego jest mniejsza od jego wartości średniej w fazie wysokiej zasilania. Wykrywanie całkowitego napełnienia realizowane jest poprzez badanie, czy w fazie zasilania podciśnieniem obserwowane jest maksimum ciśnienia wejściowego a jeśli nie, to czy pod koniec fazy napełniania komory ciśnienie wejściowe ma wartość dodatnią, większą od ostatnio wyszukanego maksimum.

Ze względu na powszechną dostępność pomiaru sygnału ciśnienia zasilania, który w odróżnieniu od pomiarów wartości ciśnień w kaniuli wylotowej i dopływowej, wykonywany jest zawsze w trakcie stosowania wspomaganie, uzyskane wyniki zostały przeanalizowane pod kątem możliwości opracowania algorytmu detekcji stanów całkowitego napełnienia i pełnego wyrzutu wyłącznie na podstawie znajomości wartości sygnału sterującego P_{pn} . Jak wcześniej zauważono, w momencie osiągnięcia przez membranę jednej z pozycji skrajnych, następuje w zależności od przypadku, wzrost lub spadek ciśnienia zasilania. Niestety oprócz tych zmian występują dość silne i długotrwałe oscylacje po zmianie trybu zasilania (podciśnienie/ciśnienie wysokie). W trakcie cyklu napełnienia wahania sygnału zasilania, spowodowane zmianą jego fazy, mogą trwać do momentu uzyskania całkowitego napełnienia. Oznacza to, że niezbędne do wykrycia zjawisko naprężenia mem-

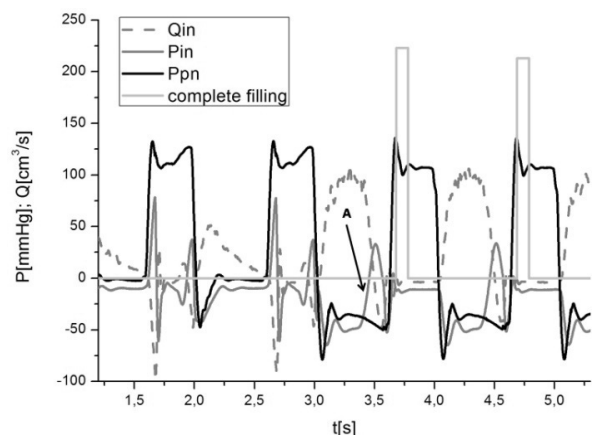
brany i związany z nim spadek wartości ciśnienia trudno odróżnić od spadku wywołanego oscylacjami. W celu analizy kolejnych faz zmian ciśnienia zastosowano różniczkowanie tego sygnału. Okazało się, że w przypadku całkowitego napełnienia obserwuje się niewielki spadek pochodnej ciśnienia zasilania, występujący bezpośrednio przed zmianą fazy zasilania.

W celu weryfikacji powyższych założeń, odpowiedni algorytm został zaimplementowany w postaci bloku VAD Diag2 (rys. 3b) w programie PExSim.

Ponieważ w przypadku wystąpienia całkowitego napełnienia obserwuje się niewielki spadek wartości pochodnej ciśnienia zasilania występujący przed zmianą fazy zasilania z niskiej na wysoką, algorytm detekcji wyszukuje kolejne minima pochodnej tego ciśnienia, od momentu rozpoczęcia napełniania komory, i sprawdza, czy ostatnie minimum jest mniejsze od ustalonego doświadczalnie progu granicznego. Wystąpienie całkowitego napełnienia sygnalizowane jest na wyjściu „filling” w postaci sygnału o wartości równej czasowi, jaki upłynął od rozpoczęcia fazy napełniania do osiągnięcia całkowitego wypełnienia komory. W przypadku całkowitego wyrzutu obserwuje się wyraźne maksimum ciśnienia zasilania, występujące bezpośrednio przed zmianą fazy zasilania. W tym przypadku najskuteczniejsze okazało się sprawdzanie, czy ostatnie maksimum ciśnienia zasilania w fazie napełniania komory jest większe od 95% wartości pierwszego. Jeśli tak, to stwierdza się wystąpienie pełnego wyrzutu. Po wykryciu pełnego wyrzutu, w chwili rozpoczęcia fazy napełniania, na wyjściu „ejection” pojawia się sygnał o wartości odpowiadającej liczbie milisekund, które upłynęły od rozpoczęcia fazy wyrzutu do osiągnięcia pełnego opróżnienia komory.

3. Wyniki

Oba bloki przetestowane zostały na podstawie danych pomiarowych uzyskanych w czasie eksperymentu identyfikacyjnego. Dla bloku VAD Diag1, zarówno w przypadku wykrywania pełnego wyrzutu jak i napełnienia, uzyskano prawidłowe wyniki zarówno dla danych z eksperymentu z włączonym jak i wyłączonym układem hybrydowym. Przykładowy przebieg obrazujący pracę bloku przedstawiono na rys. 4.



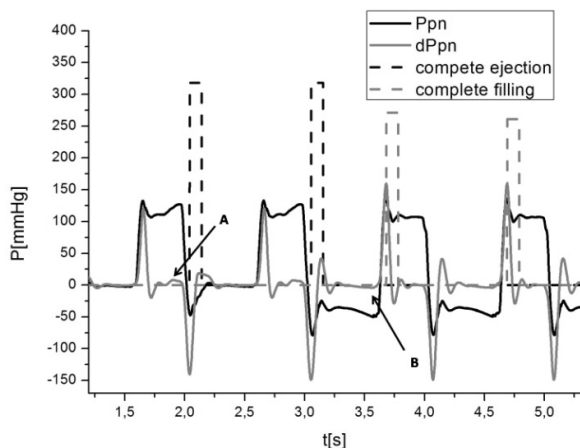
Rys. 4. Przebiegi ciśnień i przepływów w komorze oraz sygnału wykrywania całkowitego napełnienia przy pomocy bloku VAD Diag1 (praca w warunkach stałego obciążenia wyjściowego). A – wykrywany wzrost ciśnienia wejściowego

Fig. 4. The measured pressure and flow waveforms and the complete filling detection signal of the VAD Diag1 block (working under constant output load conditions). A - detectable increase of input pressure

Wystąpienie pełnego wyrzutu powoduje gwałtowny spadek wartości ciśnienia P_{out} , co jest wykrywane przez blok. Całkowite napełnienie wykrywane jest na podstawie wzrostu wartości ciśnienia w kaniuli dolotowej.

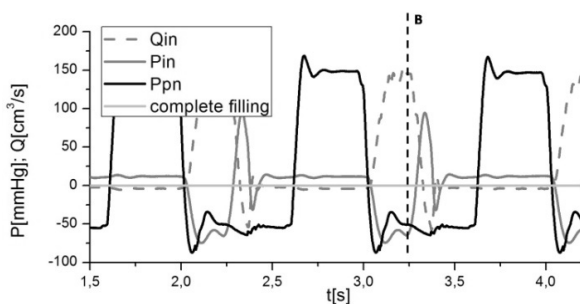
Dla bloku VAD Diag2 uzyskano również dobre wyniki (rys. 5). Dla przebadanych danych działanie algorytmu wykrywania pełnego wyrzutu było prawidłowe. W nielicznych przypadkach nie

zostaje jednak wykryty stan całkowitego napełnienia. Wynika to z faktu występowania wahań ciśnienia zasilania występujących po momencie całkowitego napełnienia (rys. 6). Blok ten zawiera jednocześnie parametry, określające progowe wartości pochodnych, które wpływają na ocenę wystąpienia pełnego wyrzutu i napełnienia. Możliwe więc, że dla innych danych pomiarowych niż zebrane w trakcie eksperymentu, konieczna będzie zmiana wartości parametrów, co ogranicza uniwersalność wykorzystania zastosowanego algorytmu.



Rys. 5. Przebiegi ciśnień i przepływów w komorze oraz sygnału wykrywania całkowitego napełnienia przy pomocy bloku VAD Diag2 (praca w warunkach stałego obciążenia wyjściowego). A - wykrywany wzrost pochodnej sygnału ciśnienia zasilania, B - wykrywany spadek wartości pochodnej ciśnienia zasilania

Fig. 5. The measured pressure and flow waveforms and the complete filling detection signal of the VAD Diag2 block (working under constant load conditions). A - detectable increase of the supply pressure derivative. B - detectable decrease in the derivative supply pressure value



Rys. 6. Przebiegi ciśnień i przepływów w komorze oraz sygnału wykrywania całkowitego napełnienia przy pomocy bloku VAD Diag2 (praca w warunkach symulacji niewydolności układu krążenia) – brak wykrycia całkowitego napełnienia. B – moment wystąpienia całkowitego napełnienia

Fig. 6. The measured pressure and flow waveforms and the complete filling detection signal of the VAD Diag2 block (work under circulatory system simulated failure conditions). No detection of complete filling. B - the moment of occurring the complete filling

4. Podsumowanie

Artykuł zawiera opis proponowanych algorytmów umożliwiających automatyczną detekcję całkowitego napełnienia oraz pełnego wyrzutu z komory krwistej urządzenia wspomagającego pracę serca POLVAD-MEV. Przedstawione rozwiązania zostały oparte na analizie danych pomiarowych uzyskanych podczas eksperymentu identyfikacyjnego sztucznej komory serca współpracującej z hybrydowym modelem układu krążenia człowieka. Pozyskane informacje umożliwiły opracowanie metod diagnostyki opartych na pomiarze trzech parametrów pracy komory: ciśnienia zasilania oraz ciśnień w kaniuli dolotowej i wylotowej urządzenia. Jednocześnie przygotowany został algorytm pozwalający na detekcję stanów granicznych wypełnienia komory na podstawie

wyłącznie jednej danej pomiarowej – ciśnienia zasilania. Przeprowadzone testy wskazują na prawidłowe funkcjonowanie metody opartej na analizie wartości trzech ciśnień, zarówno dla pracy urządzenia przy stałych wartościach obciążeń jak i symulacji niewydolności układu krążenia. Możliwość wykrywania stanu napełnienia komory jedynie na podstawie pomiaru ciśnienia w przewodzie pneumatycznym jest niezwykle istotna z punktu widzenia medycznego jak i ekonomicznego. Jest to sygnał mierzony zawsze w trakcie wspomaganie, przy czym pomiar wykonywany jest już w sterowniku urządzenia. Nie wymaga pomiarów ciśnień krwistych, czyli dodatkowego wyposażenia w czujniki samego urządzenia. Niestety zaproponowany algorytm diagnostyczny oparty wyłącznie na pomiarze tego ciśnienia nie zawsze pozwala na detekcję stanu całkowitego napełnienia komory. Wadą tego algorytmu jest dodatkowo konieczność podania pewnych parametrów progowych, które mogą się zmieniać w zależności od warunków wspomaganie. Dalsze prace koncentrować się będą na próbach wyeliminowania tych niedogodności. Planowane są również testy wykonanych bloków funkcyjnych dla danych z eksperymentu wykonanego na żywym organizmie.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu "Opracowanie technologii Metrologicznych, Informatycznych i Teleinformatycznych Dla potrzeb Protez Serca", zadanie 2.1 „Opracowanie systemu automatycznego sterowania i nadzoru pracy pozaustrojowej protezy serca”, będącego częścią Programu Wieloletniego „Polskie Sztuczne Serce”.

5. Literatura

- [1] Główny Urząd Statystyczny (GUS), Mały rocznik statystyczny Polski, 2010, <http://www.stat.gov.pl> [access 15.03.2011].
- [2] World Health Organization (WHO), The top 10 causes of death, 2004, <http://www.who.int> [access 15.03.2011].
- [3] Ferrari G., De Lazzari C., Mimmo R., Tostia G., Ambrosia D.: A modular numerical model of the cardiovascular system for studying and training in the field of cardiovascular physiopathology, *Journal of Biomedical Engineering*, 1992, vol. 14, pp. 91-107.
- [4] Mari A., Valerio A.: A circulatory model for the estimation of insulin sensitivity, *Control Engineering Practice*, 1997, vol. 5, pp. 1747-1752.
- [5] Avrahami I., Rosenfeld M., Einav S.: The Hemodynamics of the Berlin Pulsatile VAD and the Role of its MHV Configuration, *Annals of Biomedical Engineering*, 2006, vol. 34, pp. 1373-1388.
- [6] König C.S., Clark C., Mokhtarzadeh-Dehghan M.R.: Investigation of unsteady flow in a model of a ventricular assist device by numerical modeling and comparison with experiment, *Medical Engineering & Physics*, 1998, vol. 21, pp. 53-64.
- [7] Paszkowski M., Nawrat Z.: Influence of the inlet and outlet compliance on the effectiveness and work safety of a pneumatically-driven paracorporeal prosthetic ventricle, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 2005, vol. 7, pp. 41-50.
- [8] Gawlikowski M., Pustelny T., Kustosz R., Darlak M.: Non invasive blood volume measurement in pneumatic ventricular assist device POLVAD, *Molecular and Quantum Acoustics*, 2006, vol. 27, pp. 97-106.
- [9] Ferrari G., De Lazzari C., Kozarski M., Darowski M.: Hybrid (Numerical-Physical) Circulatory Models: Description and Possible Applications, *Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2006, pp. 249 – 253.
- [10] Kozarski M., Ferrari G., Clemente F., et al.: A hybrid mock circulatory system: development and testing of an electro-hydraulic impedance simulator., *Int J Artif Organs*, 2003, Volume 26, pp. 53-63.
- [11] Kozarski M., Ferrari G., Zieliński 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*, 2008, Volume 38 (september), Pages 979-989.
- [12] Janiszowski K., Wnuk P.: A novel approach to the problem of the investigation of complex dynamic systems in an industrial environment, *Problemy Eksploatacji*, 2006, Vol. 4, 17-36.