

15. Yoshioka D., Toda K., Yoshikawa Y., Sawa Y. Over 1200-day support with dual Jarvik 2000 biventricular assist device // Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery. 2014. Vol. 19 (6). PP. 1083-1084.
16. Stepanoff A.J. Centrifugal and axial flow pumps. – J. Wiley, 1948.
17. Frazier O., Cohn W.E. Continuous-flow total heart replacement device implanted in a 55-year-old man with end-stage heart failure and severe amyloidosis // Texas Heart Institute Journal. 2012. Vol. 39. № 4. PP. 542-546.
18. Yang F., Kormos R.L., Antaki J.F. High-speed visualization of disturbed pathlines in axial flow ventricular assist device under pulsatile conditions // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2015, Oct. Vol. 150 (4). PP. 938-944.
19. Selishchev S., Telyshev D. Ventricular assist device Sputnik: Description, technical features and characteristics // Trends in Biomaterials and Artificial Organs. 2015. Vol. 29 (3).

Сергей Васильевич Селищев,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедрой,
Дмитрий Викторович Тельшев,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра биомедицинских систем,
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, г. Зеленоград,
e-mail: telyshev@bmslab.miet.ru

Ю.В. Богданова, А.М. Гуськов

Синергетическое управление магнитными подшипниками ротора искусственного желудочка сердца

Аннотация

Рассматривается проблема центрирования ротора осевого насоса искусственного желудочка сердца (ИЖС) в магнитном подвесе. Малый зазор проточной части, высокие скорости вращения ротора, необходимый ресурс устройства ИЖС, его надежность и функциональность предъявляют высокие требования к системе управления ротором на магнитных подшипниках. В данной статье предлагается синтез законов управления ротором ИЖС на магнитных подшипниках на основе метода АКАР (аналитическое конструирование агрегированных регуляторов) синергетической теории управления. Показаны возможности и перспективы применения предложенной схемы управления.

Введение

Известно, что сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смерти во всем мире [1]. Главной альтернативой трансплантации стало использование устройств механической поддержки кровообращения, так называемых искусственных желудочков сердца (ИЖС) [2]. Совершенствуясь, модели ИЖС прошли путь от мембранных насосов больших габаритов: «HeartMate IP1000», VE и XVE («Thoratec Corp.», США), «Novacor» («World Heart Corp.», CA, США) – до роторных центробежных: «HeartWare» («HeartWare International, Inc.», США), «DuraHeart» («Terumo, Inc.», MI, США) – или миниатюрных осевых насосов: «Incor» («BerlinHeart GmbH», Германия), «HeartMate II» («Thoratec Corp.», США), также предусматривающих эндоваскулярную имплантацию – «Impella» («Abiomed», США) [3]-[5].

Одно из направлений развития в этой области занимается разработкой концепции ИЖС осевого типа [3], [4], [6], [7]. Достойной внимания можно считать модель «Incor» с магнитным подвесом в качестве опоры ротора. Активные магнитные подшипники (АМП), выгодно отличаясь бесконтактным подвесом ротора, получили свое распространение в быстроходных роторных машинах благодаря ряду достоинств, к которым относятся: высокую скорость вращения при сохранении их статической жесткости, высокую точность стабилизированного положения оси вращения ротора, относительно высокую грузоподъемность, высокую механическую прочность, возможность изменения жесткости и демпфирования в широких пределах [8]-[10]. Особенно важна возможность высокой точности позиционирования ротора ввиду малого зазора в камере насоса и риска гемолиза крови.

Положение ротора относительно статора регулируется с помощью системы обратной связи, что обеспечивает устойчивость положения оси вращения. Неустойчивость ротора в АМП проявляется в виде его колебаний относительно исходного положения равновесия или его «зависания» на страховочных подшипниках [8]-[10]. Стабилизация ротора осуществляется автоматическим управлением силой тока, поступающего

в обмотки электромагнитов, и соответственно управлением силами магнитного притяжения, действующими на ротор. В качестве логического управляющего устройства, как правило, применяют ПИД-регулятор, реализующий пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования [9], [10]. Считается, что почти 90 % регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм. Недостатками такого закона управления являются: ограниченная точность (особенно при управлении объектами с большой инерционностью и запаздыванием), перерегулирование, чувствительность к шумам, худшие свойства в переходных режимах (малое быстродействие и большая колебательность). Кроме того, процедура настройки параметров регулятора представляет собой сложный и достаточно субъективный процесс.

В последнее время получил развитие новый синергетический подход к проблеме синтеза систем управления нелинейными многомерными многосвязными объектами – метод АКАР, в основе которого лежит идея введения притягивающих инвариантных многообразий $\Psi_s(x_0, \dots, x_n) = 0$, на которых наилучшим образом согласуются естественные (энергетические, механические, тепловые и т. д.) свойства объекта и требования задачи управления [11]. Совокупность критериев управления или набор желаний проектировщика системы в методе АКАР принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов – аттракторов, которые выступают как цель управления. На них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи, а процедура синтеза сводится к поиску базовых законов управления, при которых эти инварианты выполняются [11]-[13].

Много работ посвящено развитию, исследованию и применению синергетического подхода к управлению нелинейными системами [11]-[15]. Результаты проведенного исследования демонстрируют эффективность синтезированных методом АКАР законов управления ротором насоса ИЖС на магнитных подшипниках.

Цель исследования: стабилизировать центральное положение ротора, вращающегося в магнитных подшипниках, осево-

го насоса ИЖС, используя принципы и методы синергетической теории управления.

Расчетная схема

Рассматривается симметричный однородный жесткий ротор массой m , диаметром d , длиной l , вращающийся вдоль продольной оси с постоянной угловой скоростью Ω в двух радиальных активных магнитных подшипниках АМП1 и АМП2. Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику ротора на АМП в координатах полюса $q = \{x_o, y_o, \alpha, \beta\}^T$, имеет вид

$$\begin{cases} m\ddot{x}_o + (k_{s1} + k_{s2})x_o + (-a_1k_{s1} + a_2k_{s2})\beta = \\ = k_{i1}i_{x1} + k_{i2}i_{x2} + P_x + m\Omega^2(e_x \cos \Omega t - e_y \sin \Omega t); \\ m\ddot{y}_o + (k_{s1} + k_{s2})y_o + (a_1k_{s1} - a_2k_{s2})\alpha = \\ = k_{i1}i_{y1} + k_{i2}i_{y2} + P_y + m\Omega^2(e_x \sin \Omega t + e_y \cos \Omega t); \\ I_x\ddot{\alpha} + I_z\Omega\dot{\beta} + (a_1k_{s1} - a_2k_{s2})y_o + (a_1^2k_{s1} + a_2^2k_{s2})\alpha = \\ = a_1k_{i1}i_{y1} - a_2k_{i2}i_{y2} + M_x + \Omega^2(-I_{zx} \sin \Omega t + I_{yz} \cos \Omega t); \\ I_y\ddot{\beta} - I_z\Omega\dot{\alpha} + (-a_1k_{s1} + a_2k_{s2})x_o + (a_1^2k_{s1} + a_2^2k_{s2})\beta = \\ = -a_1k_{i1}i_{x1} + a_2k_{i2}i_{x2} + M_y + \Omega^2(I_{yz} \sin \Omega t + I_{zx} \cos \Omega t), \end{cases} \quad (1)$$

где $I_x, I_y, I_z, I_{zx}, I_{yz}$ – компоненты тензора инерции; k_{s1}, k_{s2} , и k_{i1}, k_{i2} – соответственно позиционная «отрицательная» жесткость и токовая жесткость каналов управления; a_1, a_2 – расстояния от полюса ротора до АМП1, АМП2; $i_{x1}, i_{y1}, i_{x2}, i_{y2}$ – управляющие токи; P_x, P_y – проекции главного вектора внешних сил; M_x, M_y – проекции главного момента внешних сил; e_x, e_y – компоненты вектора эксцентриситета центра масс ротора.

После замены переменных $x_o = x_1, \dot{x}_1 = \dot{x}_2, y_o = y_1, \dot{y}_1 = \dot{y}_2, \alpha = \alpha_1, \dot{\alpha}_1 = \alpha_2, \beta = \beta_1, \dot{\beta}_1 = \beta_2$ и учитывая, что $I_x = I_y$, получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = b_1x_1 + b_2\beta_1 + b_3i_{x1} + b_4i_{x2} + b_5P_x; \\ \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = b_1y_1 - b_2\alpha_1 + b_3i_{y1} + b_4i_{y2} + b_5P_y; \\ \dot{\alpha}_1 = \alpha_2; \\ \dot{\alpha}_2 = -b_8\Omega\beta_2 - b_9y_1 - b_{10}\alpha_1 + b_{11}i_{y1} - b_{12}i_{y2} + b_{13}M_x + b_{14}\Omega^2; \\ \dot{\beta}_1 = \beta_2; \\ \dot{\beta}_2 = b_8\Omega\alpha_2 + b_9x_1 - b_{10}\beta_1 - b_{11}i_{x1} + b_{12}i_{x2} + b_{13}M_y + b_{15}\Omega^2, \end{cases} \quad (2)$$

где b_j – постоянные коэффициенты, связанные с параметрами ротора и АМП.

Приведенная система содержит четыре канала управления – управляющие токи $i_{x1}, i_{y1}, i_{x2}, i_{y2}$ и четыре возмущающих воздействия P_x, P_y, M_x, M_y .

Постановка задачи

Устойчивость подвеса обеспечивается соответствующим выбором закона управления [6]. Приведенная модель (2) содержит четыре канала управления, следовательно, может быть назначено четыре инварианта [12]. Для стабилизации положения ротора технологическими инвариантами синтезируемой системы являются $x_1 = x_1^0, y_1 = y_1^0, \alpha_1 = \alpha_1^0, \beta_1 = \beta_1^0$, где $x_1^0, y_1^0, \alpha_1^0, \beta_1^0$ – желаемые значения соответствующих координат (заданное положение ротора).

Согласно методу АКАР, для парирования внешних возмущений необходимо каждое из них представить в виде динамической модели, на выходе которой формируется аппроксимированное возмущение соответствующего класса [14]. Для этого вводятся дополнительные переменные z_1, z_2, z_3, z_4 , которые являются оценкой внешних возмущений [12], [13]. Тогда мо-

дель системы в расширенном виде, называемая «моделью синергетического синтеза», будет иметь вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = b_1x_1 + b_2\beta_1 + b_3u_1 + b_4u_2 + b_5z_1 + b_6\Omega^2; \\ \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = b_1y_1 - b_2\alpha_1 + b_3u_3 + b_4u_4 + b_5z_2 + b_7\Omega^2; \\ \dot{\alpha}_1 = \alpha_2; \\ \dot{\alpha}_2 = -b_8\Omega\beta_2 - b_9y_1 - b_{10}\alpha_1 + b_{11}u_3 - b_{12}u_4 + b_{13}z_3 + b_{14}\Omega^2; \\ \dot{\beta}_1 = \beta_2; \\ \dot{\beta}_2 = b_8\Omega\alpha_2 + b_9x_1 - b_{10}\beta_1 - b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + b_{13}z_4 + b_{15}\Omega^2; \\ \dot{z}_1 = \mu_1\Phi_{\text{тех1}}; \\ \dot{z}_2 = \mu_2\Phi_{\text{тех2}}; \\ \dot{z}_3 = \mu_3\Phi_{\text{тех3}}; \\ \dot{z}_4 = \mu_4\Phi_{\text{тех4}}, \end{cases} \quad (3)$$

где z_1, z_2, z_3, z_4 – координаты расширенной подсистемы; $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ – постоянные коэффициенты; $\Phi_{\text{тех1}} = x_1 - x_1^0, \Phi_{\text{тех2}} = y_1 - y_1^0, \Phi_{\text{тех3}} = \alpha_1 - \alpha_1^0, \Phi_{\text{тех4}} = \beta_1 - \beta_1^0$ – технологические инварианты; u_1, u_2, u_3, u_4 – управляющие воздействия.

Синергетический синтез законов управления

Для синтеза законов управления необходимо сформировать макропеременные, отвечающие целям управления. Для режима взаимосвязанного управления можно ввести параллельную совокупность инвариантных многообразий следующего вида:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \gamma_{11}A + \gamma_{12}B + \gamma_{13}C + \gamma_{14}D; \\ \Psi_2 &= \gamma_{21}A + \gamma_{22}B + \gamma_{23}C + \gamma_{24}D; \\ \Psi_3 &= \gamma_{31}A + \gamma_{32}B + \gamma_{33}C + \gamma_{34}D; \\ \Psi_4 &= \gamma_{41}A + \gamma_{42}B + \gamma_{43}C + \gamma_{44}D, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \rho_1(x_1 - x_1^0) + x_2 + h_1z_1; \\ B &= \rho_2(y_1 - y_1^0) + y_2 + h_2z_2; \\ C &= \rho_3(\alpha_1 - \alpha_1^0) + \alpha_2 + h_3z_3; \\ D &= \rho_4(\beta_1 - \beta_1^0) + \beta_2 + h_4z_4, \end{aligned}$$

где $\gamma_{ij}, \rho_j, h_j, i, j = 1, 2, 3, 4$ – постоянные коэффициенты.

Макропеременные уравнений (4) должны удовлетворять функциональным уравнениям первого порядка [11]–[15]

$$\begin{aligned} T_1\dot{\Psi}_1 + \Psi_1 &= 0; \\ T_2\dot{\Psi}_2 + \Psi_2 &= 0; \\ T_3\dot{\Psi}_3 + \Psi_3 &= 0; \\ T_4\dot{\Psi}_4 + \Psi_4 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $T_1, T_2, T_3, T_4 > 0$ – постоянные времена. Законы управления u_1, u_2, u_3, u_4 находятся из совместного решения уравнений (2), (4), (5). Желаемые значения соответствующих координат $x_1^0, y_1^0, \alpha_1^0, \beta_1^0$ для поставленной задачи должны быть равны нулю.

Параметры, связанные с ротором и АМП, имеют следующие значения: $m = 12,42 \cdot 10^{-3}$ кг; $d = 15,6 \cdot 10^{-3}$ м; $l = 22 \cdot 10^{-3}$ м; $I_x = I_y = 6,32 \cdot 10^{-7}$ кг·м²; $I_{yz} = 1,7 \cdot 10^{-11}$ кг·м²; $I_{zx} = 1,7 \cdot 10^{-11}$ кг·м²; $a_1 = a_2 = 10^{-2}$ м; $e_x = e_y = 5,31 \cdot 10^{-6}$ м; $k_{i1} = k_{i2} = 10^2$ Н·А⁻¹; $k_{s1} = k_{s2} = -10^4$ Н·м⁻¹; $\Omega = 10\,000$ об·мин⁻¹. Приведенные данные соответствуют геометрическим и массовым характеристикам разрабатываемой модели насоса ИЖС. Показатели, свя-

занные с АМП, – значения токовых и позиционных жесткостей каналов управления – приняты из диапазона допустимых значений и подразумевают дальнейшее уточнение в соответствии с требованиями и возможностями аппаратной реализации системы управления насосом ИЖС. В норме необходимый для жизнедеятельности расход крови составляет 5...6 л·мин⁻¹. В предельном режиме работы частота вращения ротора Ω составляет 10 000 об·мин⁻¹.

Графики моделирования системы (3) показаны на рис. 1-4. Параметры законов управления: $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = 0,1$; $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = 100$; $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 10^{-6}$; $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 10^{-6}$; $\gamma_{11} = \gamma_{33} = \gamma_{42} = \gamma_{44} = 1$; $\gamma_{13} = \gamma_{21} = \gamma_{24} = \gamma_{41} = 2$; $\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = \gamma_{43} = 3$; $\gamma_{14} = \gamma_{22} = \gamma_{32} = \gamma_{34} = 4$.

Внешние возмущающие силы в рассматриваемом насосе не превышают 8 Н, поэтому в качестве внешнего возмущения $P_x(t)$, $P_y(t)$, $M_x(t)$, $M_y(t)$ приняты следующие кусочно-постоянные функции:

$$P_x(t), P_y(t), M_x(t), M_y(t) = \begin{cases} 5, & t < 1; \\ 10, & t \geq 1. \end{cases}$$

Изменения выходных координат x_1 , y_1 , α_1 , β_1 в установившемся режиме равны и составляют $-1,0078 \cdot 10^{-7}$ м (рад) соответственно (рис. 1). Максимально допустимое смещение ротора равно $\Delta = 0,1$ мм. Максимальное значение скачков для координат x_1 , y_1 , α_1 , β_1 равно $3,096 \cdot 10^{-6}$ м и в общем случае регулируется соответствующим образом подобранными коэффициентами синтезированного регулятора. Фазовые траектории притягиваются из произвольных начальных состояний в окрестности максимально допустимого смещения ротора к заданному положению нуля (рис. 2).

Из графиков изменений управляющих воздействий (рис. 3, 4) видно, что установившийся режим достигается быстро, а сами управления имеют приемлемые для аппаратной реализации значения.

Моделирование на рис. 1-4 представлено для режима взаимосвязанного управления, т. е. для макропеременных уравнений (4). При подстановке в систему управления (3) упрощенных законов, т. е. при $\gamma_{12} = \gamma_{13} = \gamma_{14} = \gamma_{21} = \gamma_{23} = \gamma_{24} = \gamma_{31} = \gamma_{32} = \gamma_{34} = \gamma_{41} = \gamma_{42} = \gamma_{43} = 0$, результаты моделирования оказыва-

ются те же. Это связано с наличием внутренних связей между координатами в объекте управления, которые обеспечивают взаимодействие переменных системы и соответственно согласованность выходных координат. В этом случае макропеременные уравнений (4), соответствующие данному режиму управления, принимают упрощенный вид и преобразуются в четыре автономных уравнения, каждое из которых отвечает за стабилизацию соответствующей координаты:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \rho_1(x_1 - x_1^0) + x_2 + h_1 z_1; \\ \psi_2 &= \rho_2(y_1 - y_1^0) + y_2 + h_2 z_2; \\ \psi_3 &= \rho_3(\alpha_1 - \alpha_1^0) + \alpha_2 + h_3 z_3; \\ \psi_4 &= \rho_4(\beta_1 - \beta_1^0) + \beta_2 + h_4 z_4. \end{aligned} \quad (6)$$

Заключение

Продемонстрирован синергетический подход к управлению ротором ИЖС на магнитных подшипниках, основанный на введении инвариантных многообразий. Показано, что синтезированные на основе метода АКАР законы управления гарантируют быструю стабилизацию ротора в заданном положении и высокую точность позиционирования объекта управления. При этом обеспечивается устойчивость системы относительно стационарного состояния, соответствующего заданному режиму движения ротора. При максимальных постоянных возмущениях и выбранных параметрах законов управления положение ротора стабилизируется примерно 0,5 с, однако время регулирования может быть снижено в зависимости от измененных параметров задачи за счет постоянных времени T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , влияющих на качество динамики процессов в замкнутой системе. Таким образом, примененный для центрирования ротора в магнитном подвесе метод АКАР синергетической теории открывает широкие возможности и перспективы решения задачи управления ротором в потоке крови.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-29-01085 офи_м).

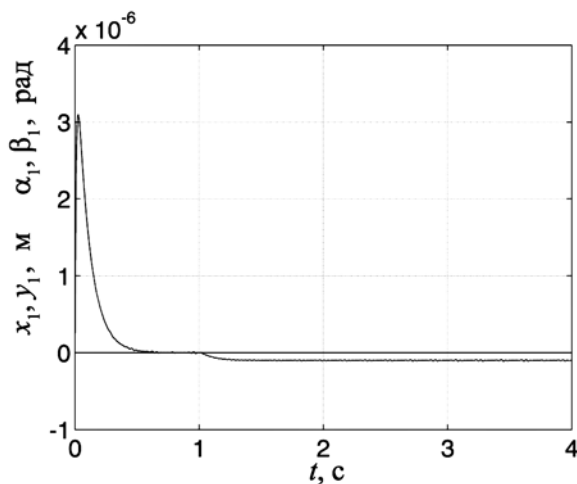


Рис. 1. Изменения выходных координат x_1 , y_1 , α_1 , β_1

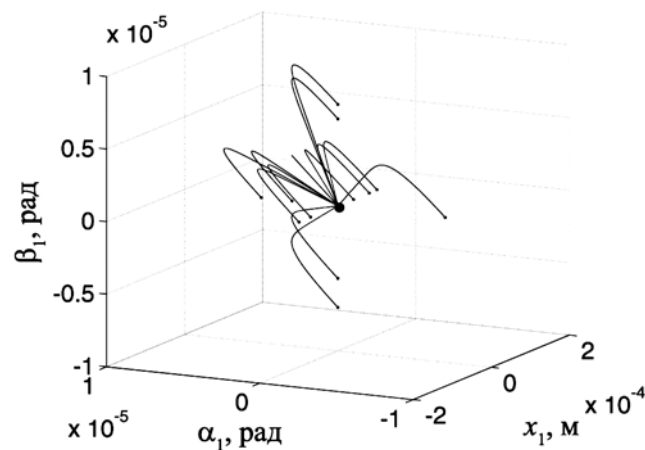


Рис. 2. Фазовый портрет в пространстве

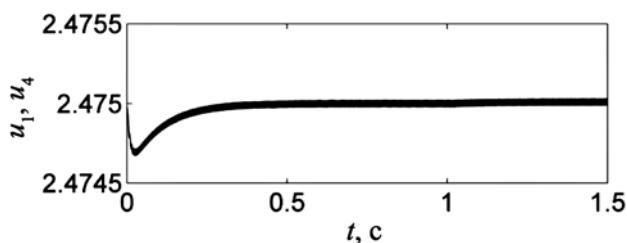


Рис. 3. Изменения управления u_1 , u_4

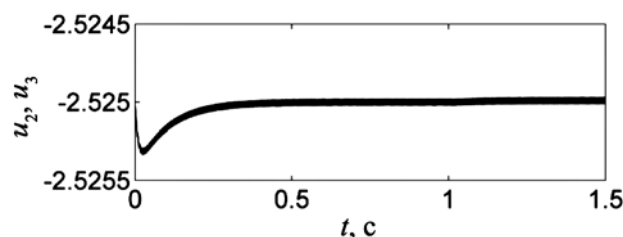


Рис. 4. Изменения управления u_2 , u_3

Список литературы:

1. Сердечно-сосудистые заболевания. ВОЗ / <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru/> (дата обращения: 19.10.2015 г.).
2. Чернявский А.М. и др. Механическая поддержка у больных с терминальной сердечной недостаточностью // Клиническая и экспериментальная хирургия. Журнал им. акад. Б.В. Петровского. 2014. № 2. С. 25-34.
3. Богданова Ю.В., Гуськов А.М. Особенности проектирования устройства искусственного желудочка сердца: обзор работ (Design features of left ventricular assist device (LVAD): Review of works) // Наука и образование. 2014. № 3. С. 170-187.
4. Банин Е.П., Гуськов А.М., Сорокин Ф.Д. Анализ современных подходов к проектированию искусственных желудочков сердца роторного типа // Наука и образование. 2014. № 2. С. 250-268.
5. Research Report 2001/2002 / Institute for Biomedical Technologies, Aachen University; Director: Rau G., 2002. 101 p.
6. Банин Е.П., Гуськов А.М., Сорокин Ф.Д. Математическое моделирование поведения крови во входном аппарате искусственного желудочка сердца методами CFD / XXVI МИКМУС-2014. Труды конференции. 2015. С. 352-356.
7. Gomez A.D. Control of a magnetically levitated ventricular assist device: Degree of Master of Science in Mechanical Engineering. – Rochester Institute of Technology, 2009. 140 p.
8. Вейнберг Д.М., Вережагин В.П. К определению основных параметров электромагнитных подшипников // Труды ВНИИЭМ. 1989. Т. 89. С. 12-19.
9. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
10. Schweizer G., Maslen E.H. Magnetic Bearings. Theory, Design and Application to Rotating Machinery. – Springer-Verlag, 2009.
11. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
12. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы / Под. общ. ред. А.А. Колесникова. Изд. стереотип. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 304 с.
13. Современная прикладная теория управления. В 3-х частях. Ч. II. Синергетический подход в теории управления / Под. ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 559 с.
14. Кузьменко А.А. и др. Синерго-кибернетический подход к нелинейному адаптивному управлению гидрогенератором энергосистемы / ВСПУ-2014, Москва. 2014. 9 с.
15. Bezuglov A. et al. Synergetic Control Theory Approach for Solving Systems of Nonlinear Equations / Earth Sciences Resources Institute, University of South Carolina Columbia, USA. 6 p.

Юлия Владимировна Богданова,
аспирант,
кафедра «Прикладная механика»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
инженер НИЦ «Курчатовский институт»,
Александр Михайлович Гуськов,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра «Прикладная механика»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: bogdanova.bmstu@gmail.com

Д.С. Петухов, Д.В. Телышев

Алгоритмы управления роторными аппаратами вспомогательного кровообращения

Аннотация

В данной статье приведен обзор систем, методов и алгоритмов управления для аппаратов вспомогательного кровообращения, опубликованных в литературе за последние пять лет. Дано краткое описание систем управления, используемых в клинической практике. Рассмотрены алгоритмы оценки и регулировки, управления режимами работы, физиологического управления аппаратами вспомогательного кровообращения роторного типа.

Введение

Аппараты вспомогательного кровообращения (АВК) зарекомендовали себя как эффективное средство лечения острых форм сердечной недостаточности наряду с трансплантацией сердца [1]-[4]. Множество пациентов с различной патофизиологией сердечной деятельности и широкий выбор АВК для их лечения обуславливают необходимость в различных стратегиях лечения [5]-[7]. Для реализации подобных стратегий лечения, автоматического управления АВК в рамках выбранной стратегии, повышения качества жизни пациента, предотвращения проблем, обусловленных спецификой работы имплантируемого роторного насоса крови (РНК), разрабатываются различные алгоритмы, методы и системы управления.

Цель рассматриваемой работы заключается в обзоре систем, методов и алгоритмов управления роторными насосами крови для аппаратов вспомогательного кровообращения, опубликованных в литературе за последние пять лет. Ранее также были опубликованы аналогичные обзоры и даны различные варианты классификации систем управления для аппаратов вспомогательного кровообращения [8]-[10]. Отличие

данной работы заключается в акценте на возможностях и преимуществах, которые обеспечивают рассматриваемые системы управления; помимо этого, в работе рассматриваются системы управления АВК, которые на данный момент применяются в клинической практике.

Системы управления АВК в клинической практике

В насосах «HeartWare HVAD» и «HeartWare MVAD» кровотоки оцениваются косвенными методами с использованием величин скорости вращения ротора, тока двигателя и гематокрита, в качестве входных параметров [11]-[15].

Осевой насос «Javik 2000» позволяет пациенту изменять скорость насоса [16], [17].

В АВК «HeartMate II» [18] для оценки расхода используются значения мощности и скорости насоса.

В осевом насосе «HeartAssist 5» используется ультразвуковой датчик расхода, который крепится к выходной канюле [19].

Системы оценки и регулировки расхода РНК

Бессенсорный метод оценки расхода центробежного насоса крови с использованием измеренного крутящего момента и