

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КУЛАЧКОВОГО МЕХАНИЗМА МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

Беляев Л. В., Шевченко А. П., Жданов А. В.

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Владимир, Россия (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87), e-mail: tms@vlsu.ru

В статье предложен подход к созданию мехатронного модуля системы вспомогательного кровообращения (ВК) на базе реверсивного исполнительного механизма и высокомоментного тихоходного двигателя. В качестве исполнительного механизма предлагается использовать пространственный кулачок, который приводится в движение от роликов, установленных на роторе электродвигателя оригинальной конструкции. Геометрические параметры кулачкового механизма получены в результате проведенного синтеза на основе известного экспоненциального закона выброса крови из левого желудочка сердца. Получены графики законов перемещения и скорости, учитывающие радиус ролика на трех интервалах взаимодействия ролика и кулачка: при подходе ролика к передней кромке кулачка, при движении ролика по вершине кулачка и, наконец, при сходе задней кромки кулачка с ролика. Использование полученных законов позволит избежать жестких ударов и увеличить срок службы механизма. По результатам проведенного синтеза и исходя из конструктивных соображений, была разработана компоновка мехатронного модуля ВК на базе пространственного кулачкового механизма и высокомоментного двигателя.

Ключевые слова: кулачковый механизм, мехатронный модуль, вспомогательное кровообращение.

GEOMETRICAL SYNTHESIS OF THE SPACE CAM MECHANISM OF MECHATRONIC UNITE FOR AUXILIARY BLOOD CIRCULATION SYSTEMS

Belayev L.V., Shevchenko A. P., Zhdanov A. V.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Vladimir, Russia (600000, Vladimir, Gorky street, 87), e-mail: tms@vlsu.ru

In article approach to creation of the mechatronic unite of system of the auxiliary blood circulation (ABC) on the basis of the reversible executive mechanism and the high-torque, low-speed engine is offered. As the executive mechanism it is offered to use a spatial cam which is set in motion from rollers established on a rotor of the electric motor of an original design. Geometrical parameters of the cam mechanism are received in result of the carried-out synthesis on the basis of the known exponential law of emission of blood from the left ventricle of heart. Schedules of laws of movement and the speeds considering radius of a role on three intervals of interaction of a roller and a cam are received: when approaching roller to a forward edge of a cam, at movement of a roller on top of a cam and, at last, at a descent of a back edge of a cam from a roller. Use received the law will allow to avoid rigid blows and to increase mechanism service life. By results of the carried-out synthesis, and proceeding from constructive reasons, ABC mechatronic unite configuration on the basis of the spatial cam mechanism and the high-torque engine was developed.

Key words: cam mechanism, mechatronic unite, auxiliary blood circulation.

Одним из методов лечения сердечных заболеваний является применение механических систем, которые осуществляют временную замену функции левого желудочка сердца до восстановления его функциональной способности [1].

При применении механических систем вспомогательного кровообращения (ВК) пульсирующего типа устройством, непосредственно перекачивающим кровь, является искусственный желудочек сердца (ИЖС), представляющий собой насос мембранного или мешотчатого типа [2]. Перекачивание крови при использовании обоих видов ИЖС осуществляется за счет циклического изменения объема ИЖС с требуемой частотой.

В терминах технической механики это означает, что выходные элементы мехатронного модуля системы ВК должны воздействовать на мембрану ИЖС, совершая возвратно-поступательное движение с частотой 1...2 Гц, обеспечивая выброс крови из камеры ИЖС и преодолевая давление в 120 мм рт. ст. [3].

Возвратно-поступательное движение толкателя модуля можно обеспечить двумя путями: применяя нереверсивный исполнительный механизм при реверсивном режиме работы двигателя, либо применяя реверсивный механизм при вращении двигателя в одном направлении. В модуле с нереверсивным механизмом обеспечение реверса и необходимого соотношения систола / диастола осуществляется системой управления, тогда как в модуле с реверсивным механизмом реверс обеспечивается конструкцией передачи, а соотношение систола / диастола – профилем контактирующей поверхности выходного звена механизма.

Одним из перспективных вариантов по созданию модуля системы ВК с реализацией однонаправленного вращения двигателя является применение пространственного кулачкового механизма. В качестве электродвигателя целесообразно использовать электрическую машину с редкоземельными металлами [4, 5], т. к. она позволит обеспечить требуемые технические характеристики работы системы и исключить промежуточный редуктор. Встраивание кулачкового механизма в полый ротор электродвигателя позволит повысить надежность разрабатываемой системы ВК за счет сокращения количества элементов системы.

Для обеспечения экспоненциального закона выброса [6] кулачковый механизм должен обеспечивать перемещение толкателя мембраны по закону вида «подъем – опускание – выстой» (рис. 1).



Рис. 1. Закон движения толкателя в зависимости от времени $H = f(t)$

Развертка профиля кулачка характеризуется тремя прямыми линиями: первая линия соответствует участку систолы, вторая линия – участку диастолы, третья линия – участку паузы. Закон перемещения кулачка на участке систолы представляется прямой линией, проходящей через начало координат и точку с координатами $t = t_1, H = h$. Из определителя (1) найдем уравнение прямой (2), описывающей участок систолы:

$$\begin{vmatrix} t_1 & h \\ t & H \end{vmatrix} = 0; \text{ откуда} \quad (1)$$

$$H(t) = \frac{h}{t_1}t; \quad 0 \leq t < t_1, \quad 0 \leq H < h. \quad (2)$$

Аналогично по определителю (3) находится уравнения прямой, описывающей участок диа-
стола (4).

$$\begin{vmatrix} t_2 - t_1 & 0 - h \\ t - t_1 & H - h \end{vmatrix} = 0; \text{ откуда} \quad (3)$$

$$H = \frac{ht_2}{t_2 - t_1} - \frac{h}{t_2 - t_1}t; \quad t_1 \leq t < t_2; \quad 0 \leq H < h. \quad (4)$$

Перемещение кулачка на участке паузы определяется прямой (5):

$$H = 0; \quad t_2 \leq t < t_3. \quad (5)$$

Очевидно, что скорость перемещения толкателя на соответствующих участках можно
найти, дифференцируя соответствующие уравнения движения. Тогда уравнения, описываю-
щие скорости перемещения толкателя на каждом из характерных участков, будут иметь вид:

$$V_T = \frac{dH}{dt} = \begin{cases} h/t_1, & 0 \leq t < t_1; \\ \frac{h}{t_2 - t_1}, & t_1 \leq t < t_2; \\ 0, & t_2 \leq t < t_3. \end{cases} \quad (6)$$

График скорости перемещения толкателя представлен на рис. 2.

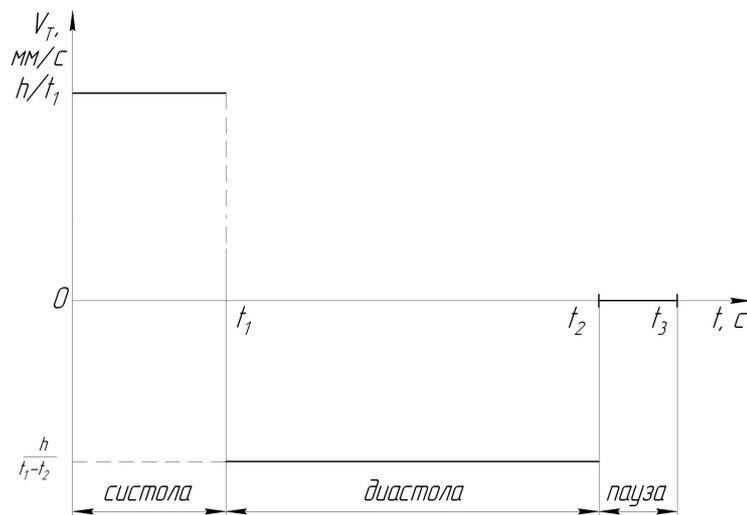


Рис. 2. График скорости перемещения толкателя

Представленный график скорости перемещения толкателя имеет участки, на которых
скорость принимает постоянное значение, а, следовательно, ускорение равняется нулю, так
же имеются разрывы на графике скорости в моменты смены фаз движения кулачка. При
мгновенном изменении скорости толкателя ускорение и сила инерции звена теоретически

будут стремиться к бесконечности, что будет служить причиной так называемых «жестких» ударов и, как следствие, приведет к преждевременной поломке механизма. Для устранения указанного недостатка необходимо обеспечить работу механизма с непрерывно изменяющейся скоростью. В связи с этим необходимо провести уточнение закона перемещения толкателя с учетом радиуса ролика на трех интервалах взаимодействия ролика и кулачка: при подходе ролика к передней кромке кулачка, при движении ролика по вершине кулачка и, наконец, при сходе задней кромки кулачка с ролика.

Рассмотрим первый интервал взаимодействия. Ведущим звеном является ролик. На рис. 3 а представлено геометрическое построение взаимного положения ролика и кулачка для первого интервала. Точки A и B соответствуют местам контакта ролика с кулачком в начале подъема кулачка. Угол между контактными точками и центром ролика обозначен β_1 . Точка C соответствует теоретическому профилю кулачка, где должен начинаться его подъем при условии, что радиус ролика $r_p = 0$. Центр кулачка обозначим буквой O . Из рисунка видно, что взаимодействие ролика и кулачка начнется раньше и будет причиной более раннего подъема кулачка. Величину этого упреждения обозначим Δl_1 и найдем из треугольника ΔAOC :

$$\Delta l_1 = r_p \operatorname{tg} \beta_1 / 2. \quad (7)$$

Для кулачка при его равномерном движении масштабный коэффициент для расчета времени поворота k_t ротора будет равен:

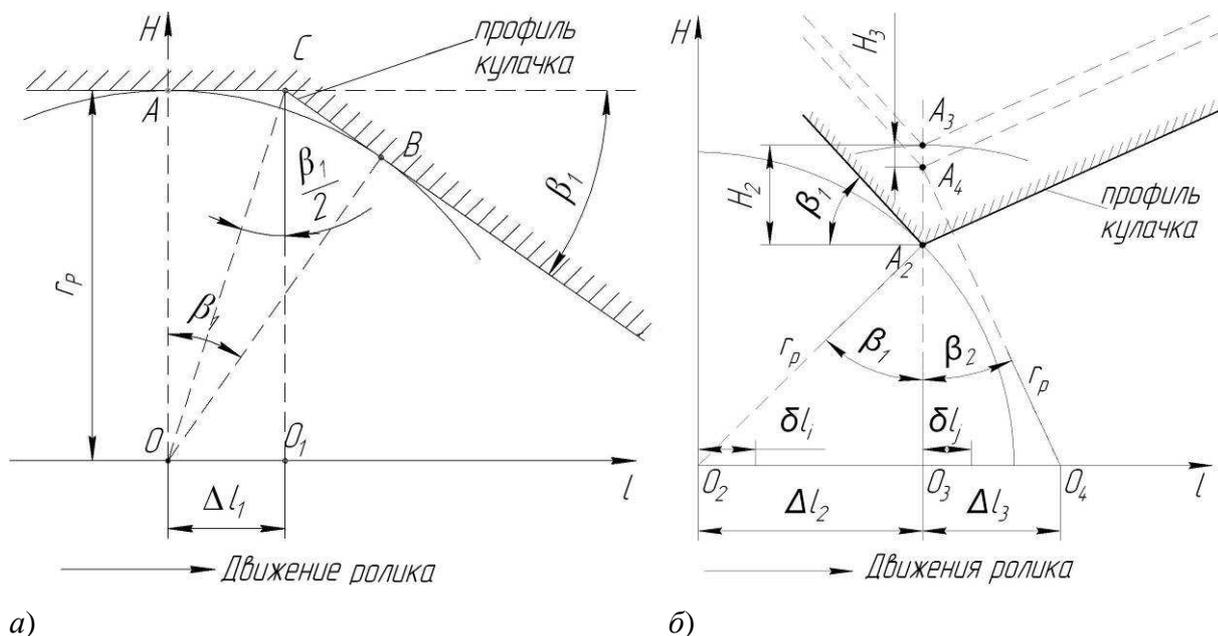
$$k_{t1} = t_3 / l_k \text{ (с/мм)}, \quad (8)$$

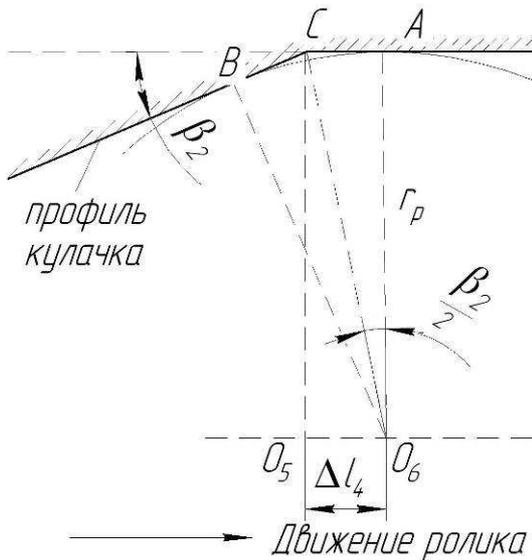
где l_k – длина развертки кулачка.

Следовательно, упреждение по времени с учетом (8) составляет:

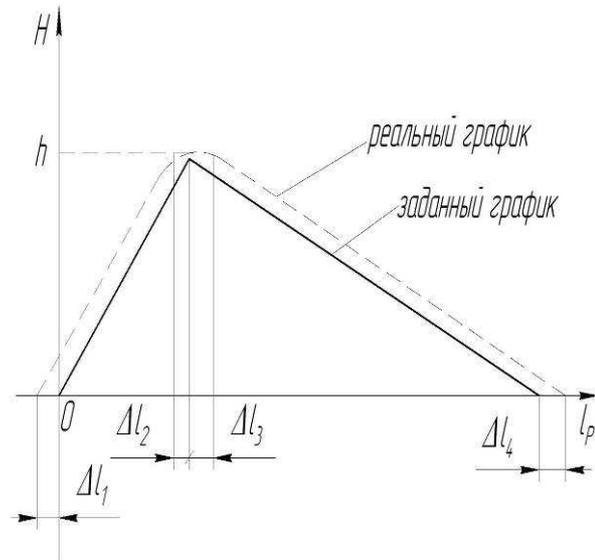
$$\Delta t_k = k_{t1} \Delta l_{k1}. \quad (9)$$

Подъема кулачка (Δh) на этом интервале не будет.





а)



б)

Рис. 3. Интервалы движения ролика: а – при подходе ролика к передней кромке кулачка; б – при движении ролика по вершине кулачка; в – при сходе задней кромки кулачка с ролика; г – уточненный график перемещения толкателя в функции перемещения ролика

Рассмотрим второй интервал взаимодействия, на котором ролик движется по вершине кулачка. Геометрическое построение взаимодействия ролика и кулачка на этом интервале представлено на рис.3 б. Это взаимодействие осуществляется на двух участках Δl_2 и Δl_3 . Соответствующие положения центров ролика обозначены буквами O_2 , O_3 и O_4 . На участке Δl_2 поверхность ролика давит на вершину кулачка, на участке Δl_3 вершина кулачка давит на поверхность ролика. Точка O_3 соответствует положению ролика при максимальном подъеме кулачка. Положение точек контакта ролика и кулачка обозначены буквами A_1 , A_2 , A_3 .

Из рис. 3 б следует, что $\Delta l_2 = r_p \sin \beta_1$, $\Delta l_3 = r_p \sin \beta_2$, где β_1 , β_2 – углы кулачка, соответствующие участкам систолы и диастолы.

Известно, что для окружности произведение отрезков хорды равно произведению отрезков диаметра. Применительно к началу движения ролика на участке Δl_2 будет справедливо уравнение:

$$(\Delta l_2)^2 = H_2(2r_p - H_2), \quad (10)$$

где H_2 – расстояние A_2A_3 от точки контакта ролика с кулачком в начале участка Δl_2 до точки контакта при максимальном подъеме кулачка. Из уравнения (10) следует:

$$H_2 = r_p - \sqrt{r_p^2 - (\Delta l_2)^2}.$$

Задавшись на участке Δl_2 небольшим перемещением центра кулачка δl_i . Уравнение (10) примет вид:

$$(\Delta l_2 - \delta l_i)^2 = \delta H_i(2r_p - \delta H_i), \quad (11)$$

где δH_i – подъем кулачка, соответствующий перемещению центра ролика δl_i .

Из уравнения (11) следует:

$$\delta H_i = r_p - \sqrt{r_p^2 - (\Delta l_2 - \delta l_i)^2}, \quad (12)$$

дифференцируя последнее уравнение, получим:

$$\frac{d(\delta H_i)}{d(\delta l_i)} = \frac{\Delta l_2 - \delta l_i}{\sqrt{r_p^2 - (\Delta l_2 - \delta l_i)^2}}, \quad 0 \leq \delta l_i \leq \Delta l_2. \quad (13)$$

Рассмотрим движение кулачка при его спуске на участке Δl_3 . На этом участке кулачок опустится на величину $H_3 = r_p - r_p \cos \beta_2$.

Зададимся небольшим перемещением центра ролика δl_j . В соответствии с уравнением (10) получим равенство: $(\delta l_j)^2 = \delta H_j(2r_p - \delta H_j)$, из которого следует:

$$\delta H_j = r_p - \sqrt{r_p^2 - (\delta l_j)^2}, \quad 0 \leq \delta l_j \leq \Delta l_3. \quad (14)$$

Дифференцируя уравнение (14), получим:

$$\frac{d(\delta H_j)}{d(\delta l_j)} = \frac{\delta l_j}{\sqrt{r_p^2 - (\delta l_j)^2}} \quad (15)$$

Рассмотрим третий интервал взаимодействия ролика и кулачка, соответствующий окончанию спуска кулачка и началу участка паузы в работе кулачкового механизма. Положение ролика и кулачка на этом интервале изображено на рис. 3в. Точка O_5 соответствует концу кулачка C в проекции на направление движения ролика. Точка O_6 отображает положение центра ролика при сходе его с наклонной поверхности кулачка, т.е. запаздыванию участка паузы. Из $\Delta A O_6 C$ следует, что $\Delta l_4 = r_p \tan(\beta_2/2)$. Уточненный график перемещения толкателя в функции перемещения ролика с учетом его радиуса будет иметь вид, представленный на рис. 3 г.

С учетом уточнения закона перемещения толкателя график скорости толкателя не будет иметь разрывов, что позволит избежать жестких ударов и увеличить срок службы механизма. График скорости перемещения толкателя в функции времени и перемещения центра ролика с учетом его радиуса будет иметь вид, представленный на рис. 4. На участке Δl_2 и Δl_3 график строится с использованием уравнения (3) и масштабных коэффициентов k_r .

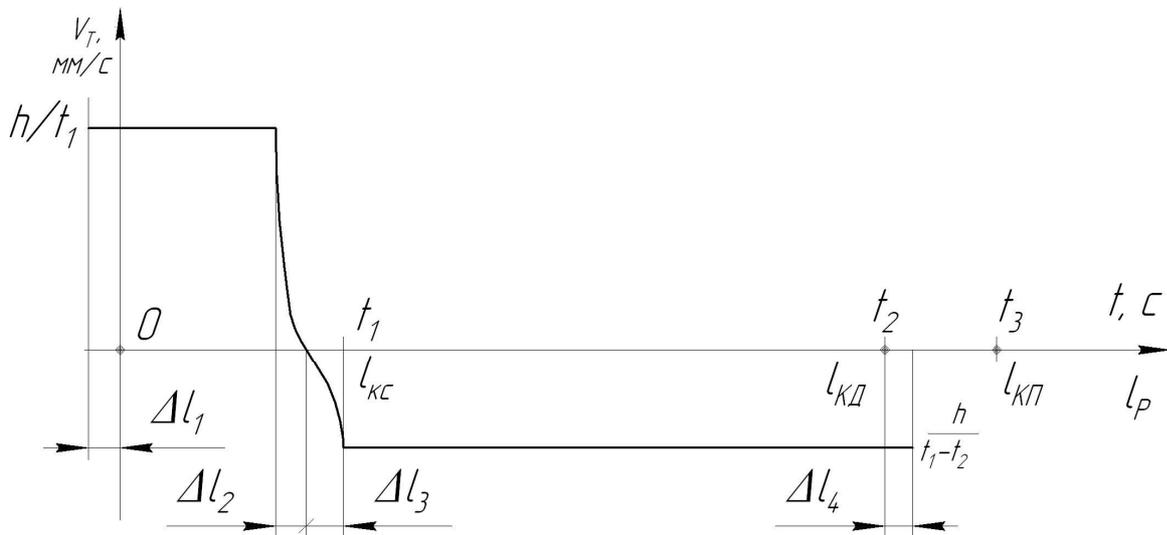
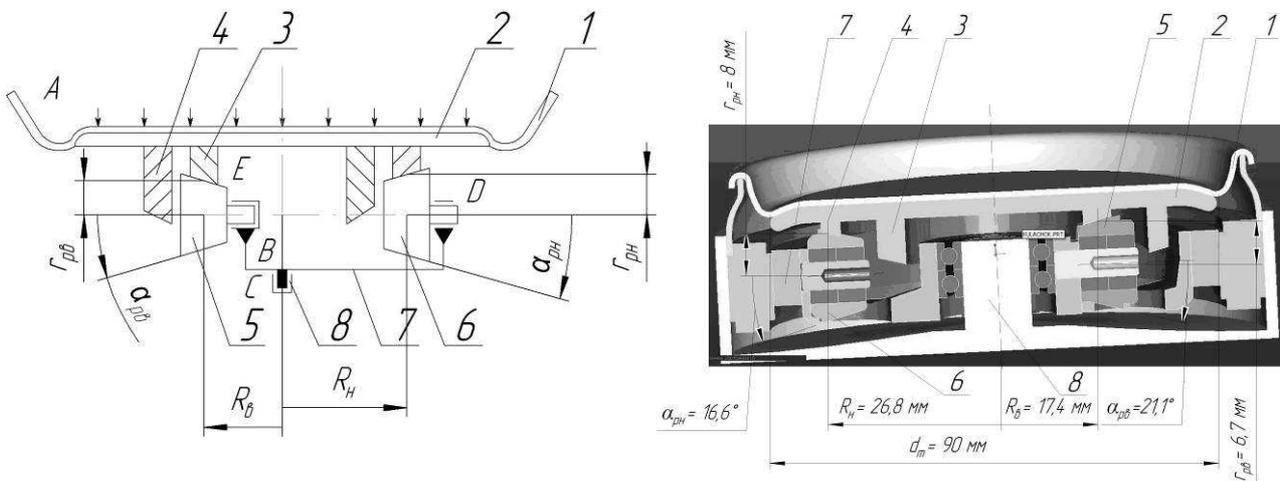


Рис. 4. Уточненный график скорости перемещения толкателя

По результатам проведенного синтеза и исходя из конструктивных соображений, была разработана компоновка мехатронного модуля ВК на базе пространственного кулачкового механизма и высокомоментного двигателя. Предлагаемый модуль работает следующим образом. Вращение от ротора электродвигателя 7 передается на наружный 6 и внутренний 5 ролики, которые взаимодействуют с внутренним 3 и наружным 4 кулачками. Внутренний 3 и наружный 4 кулачки выполнены заодно с толкателем 2. Толкатель 2 воздействует на мембрану ИЖС 1, заставляя ее совершать возвратно-поступательные движения и обеспечивая нужный выброс крови из камеры ИЖС. Внутренний 3 и наружный 4 кулачки закреплены на роторе электродвигателя 7, который имеет оригинальную конструкцию и вращается на подшипниковой опоре 8 (рис. 5).

Для обеспечения работы механизма используется силовое замыкание кинематической цепи по средствам действия упругих сил, передаваемых от мембраны, которые прижимают кулачок к роликам. Края мембраны закрепляются на корпусе системы ВК.



а)

б)

Рис. 5. Мехатронный модуль системы ВК (корпус ИЖС не показан): а) – структурная схе-

ма: 1 – диафрагма, 2 – пластина толкателя, 3 – внутренний кулачок, 4 – наружный кулачок, 5 – внутренний ролик, 6 – наружный ролик, 7 – ротор электродвигателя, 8 – опора ротора;
б) – 3-Dмодель системы

Результаты геометрического синтеза исполнительного механизма использованы для разработки компоновочного решения модуля системы ВК [7], имеющего меньшие габаритные размеры по сравнению с реверсивными системами [8] и обеспечивающего все медико-технические требования.

Список литературы

1. Абакумов М. В. Методика математического моделирования сердечно-сосудистой системы / М. В. Абакумов [и др.] / Препринт МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 1999. – 11 с.
2. Беленький Ю. М. Выбор и программирование параметров бесконтактного моментного привода / Ю. М. Беленький, А. Г. Микеров. – Л.: ЛДНТП, 1990. – 24 с.
3. Беленький Ю. М. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов / Ю. М. Беленький, Г. С. Зеленков, А. Г. Микеров. – Л.: ЛДНТП, 1987. – 28 с.
4. Беляев Л. В., Жданов А. В., Куликов Н. И. Экспериментальные исследования имплантируемой системы вспомогательного кровообращения пульсирующего типа на базе вентильного двигателя и мембранного насоса крови // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1 (часть 3). – С. 676-681.
5. Имплантируемая система вспомогательного кровообращения на базе мехатронных модулей / Владим. гос. ун-т. [под ред. В. В. Морозова]. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 134 с.
6. Медико-технические требования на создание электромеханической имплантируемой системы обхода левого желудочка сердца. – М.: НИИТиИО, 2001. – 10 с.
7. Патент РФ № 115664, 10.05.2012.
8. Шумаков В. И. Искусственное сердце и вспомогательное кровообращение / В. И. Шумаков, В. Е. Толпекин, Д. В. Шумаков. – М.: Янус-К, 2003. – 376 с.

Рецензенты:

Гоц А. Н., д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры тепловых двигателей и энергетических установок ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир.

Житников Б. Ю., д-р техн. наук, профессор кафедры специальной техники и информационных технологий, заместитель начальника по научной работе ФКОУ ВПО ВЮИ ФСИН России, г. Владимир.