

## **АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ СИСТЕМЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

**Трефилов М.А., Жданов А.В.**

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир*

*Владимир, Россия (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87), tms@vlsu.ru*

---

Проведен анализ на надежность мехатронного модуля имплантируемой системы вспомогательного кровообращения пульсирующего типа. С использованием метода счетчиков сети Петри на основе математической модели динамики и работоспособности мехатронного модуля проведены расчеты вероятности безотказной работы имплантируемой системы вспомогательного кровообращения в течение длительного времени в процессе эксплуатации. В процессе расчета построена сеть Петри для рассматриваемой системы, определены возможные ошибки в ее работе, их последовательности, проведены тестовые запуски системы для получения данных для расчета, определено среднее время возникновения разного рода ошибок. В результате проведенного анализа показана высокая надежность системы вспомогательного кровообращения на базе предлагаемых мехатронных модулей при ее работе в течение длительного времени, определены влияния отдельных компонентов мехатронного модуля на общую надежность. Также показана применимость метода счетчиков сети Петри для расчетов вероятности безотказной работы сложных мехатронных систем.

---

Ключевые слова: система вспомогательного кровообращения, надежность системы, сеть Петри.

## **RELIABILITY ANALYSIS OF CARDIOPULMONARY BYPASS SYSTEM USING PETRI NETS**

**Trefilov M.A., Zhdanov A.V.**

*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir*

*Vladimir, Russia (600000, Vladimir, Gorky street, 87) tms@vlsu.ru*

---

The analysis of the reliability of mechatronic module of implantable circulatory support systems such as pulsating. Using the method of the counters of Petri net-based mathematical model of the dynamics and performance of mechatronic module calculated the probability of failure-free operation of implantable circulatory support for a long time in service. In the process of calculating the constructed Petri net for the system, identify potential errors in its work, their sequence, carried out test runs of the system to retrieve data for the calculation to determine the average time of occurrence of different kinds of errors. The analysis showed high reliability of auxiliary circulation on the basis proposed in mechatronic modules of work for a long time, determined the effect of individual components of the mechatronic module for overall reliability. Also shown is the applicability of the method of Petri net metering to calculate the probability of faultless operation of complex mechatronic systems.

---

Key words: circulatory support systems, system reliability, Petri net.

Сердечно-сосудистые заболевания занимают первое место в мире среди причин смерти населения, превышая смертность от онкологических заболеваний и несчастных случаев. Сегодня в мире выполнено более 50 тысяч пересадок сердца. Острый дефицит донорских органов вынуждает все шире применять механические замещающие устройства. Проблема замены жизненно важных органов искусственными является одной из наиболее актуальных в современной медицине и затрагивает широкий круг вопросов медицинского и медико-технического характера.

В решении данной проблемы выделяют два основных направления. Во-первых, это постоянная замена естественного органа протезом, полностью имитирующим его функции – искусственное сердце (ИС). Второй способ – временная замена функции на период лечения органа до восстановления его функциональной способности – система вспомогательного кровообращения (ВК). Одной из важных задач при этом является создание надежного привода или модуля, обеспечивающего непрерывный кровоток,

деятельность искусственного сердца должна быть ритмичной, способной к регулированию в широком диапазоне, надежной и устойчивой. Именно поэтому встает вопрос о моделировании и расчете надежности данных систем.

На сегодняшний день существует множество подходов к такого рода моделированию. Это и составление условных диаграмм систем управления, модульное представление систем в имитационном моделировании, использование линейных графов. В нашей стране предложены только основные принципы моделирования комплексных технологических систем, таких как модульное представление систем, составление блок-схем. Главным источником информации является статистическая информация, данные об эксплуатации систем. Одним из основных недостатков данных методов является отсутствие в модели информации о возможных ошибках, представления состояний системы, значительное усложнение математической модели после увеличения рассматриваемой системы. В связи с этим возникает необходимость использования новых подходов, одним из которых является применение сетевых структур.

В данной статье приводится исследование надежности на базе мехатронного модуля имплантируемой системы вспомогательного кровообращения [1] методом счетчиков сети Петри [2]. Работа мехатронного модуля (ММ) в составе имплантируемой системы ВК описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} T_c T_\gamma \ddot{x}_1 + T_c \dot{x}_1 + x_1 = [v_{sys}^U - v_{dia}^F - v_{TP}(\dot{x}_1)] T_c, 0 < t \leq t_c; \\ T_\gamma \ddot{x}_2 + \dot{x}_2 = [v_{sys}^U - v_{sys}^F - v_{TP}(\dot{x}_2)] T_c, t_c \leq t \leq t_s; \\ T_\gamma \ddot{x}_3 + \dot{x}_3 = -[v_{dia}^U + v_{sys}^F - v_{TP}(\dot{x}_3)] T_c, t_s < t \leq t_{sys}; \\ T_\gamma \ddot{x}_4 + \dot{x}_4 = -v_{dia}^U, t_{sys} \leq t \leq t_d; \\ T_\gamma \ddot{x}_5 + \dot{x}_5 = v_{sys}^U, t_d < t \leq t_u; \end{cases}$$

с начальными и краевыми условиями

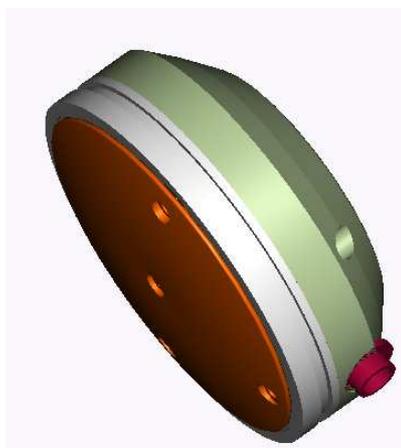
$$\begin{aligned} x_1(0) = \dot{x}_1(0) = 0; x_1(t_c) = x_2(t_c) = H_c; \dot{x}_1(t_c) = \dot{x}_2(t_c); x_2(t_s) = x_3(t_s); \\ \dot{x}_2(t_s) = \dot{x}_3(t_s); x_3(t_{sys}) = x_4(t_{sys}) = H; \dot{x}_3(t_{sys}) = \dot{x}_4(t_{sys}) = 0; \\ x_4(t_d) = x_5(t_d); \dot{x}_4(t_d) = \dot{x}_5(t_d); x_5(t_u) = 0; \dot{x}_5(t_u) = 0, \end{aligned}$$

где  $x_1$  – выходное перемещение в изоволюметрическую стадию систолы,  $x_2, x_3$  – выходные перемещения в фазу изгнания (2 и 3 фазы),  $x_4, x_5$  – выходные перемещения в фазу диастолы (4 и 5 фазы),  $T_c = \frac{\eta M_f}{\omega_{xx} S_x^2 c}$  – постоянная времени, вызванная растяжимостью камеры искусственного желудочка сердца (ИЖС),  $\eta$  – КПД передачи,  $\omega_{xx}$  – угловая передача холостого хода двигателя,  $S_x = \frac{v}{\omega}$  – передаточная функция исполнительного механизма,  $c$  – коэффициент упругости стенок камеры ИЖС,  $M_f$  – пусковой момент двигателя,  $T_\gamma$  – электромеханическая постоянная времени ММ,  $v^U = v_{xx} u$  – идеальная скорость нагрузки,  $v^F = v_{xx} \frac{S_x F_p}{\eta M_f}$  – эквивалентная скорость нормального давления  $p$ ,  $v_{TP}(\dot{x}) = v_{xx} \frac{S_x F_{TP}(\dot{x})}{\eta M_f}$  – эквивалентная скорость сил вязкого трения,  $H$  – полный ход штока,  $H_c$  – перемещение, затрачиваемое на нагнетание давления.

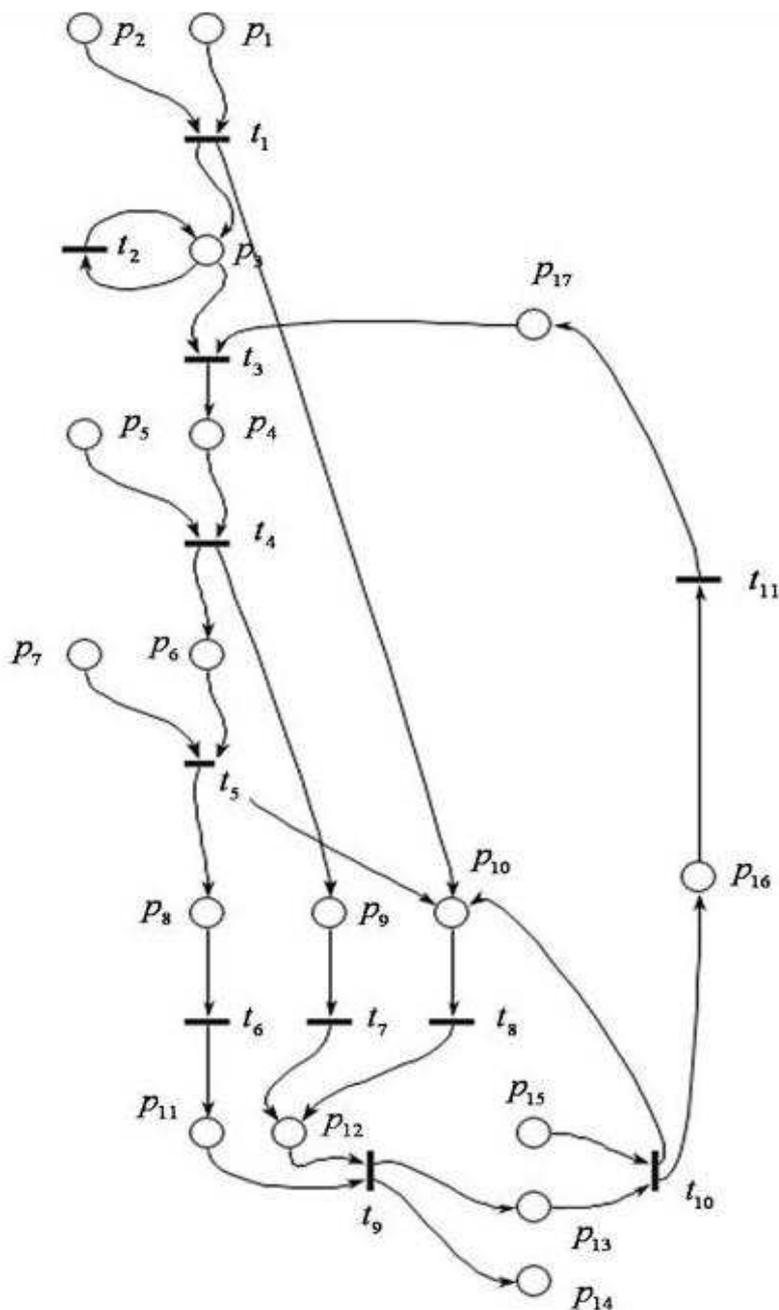
Сеть Петри для указанного модуля, включая факторы, которые могут привести к ошибке, приведена на рис. 1в.



а) исследуемый объект – ММ



б) твердотельная модель (Pro/Engineer WF 4)



в) сеть Петри для рассматриваемого модуля

Рис. 1. ММ системы ВК

Здесь состояние  $p_1$  соответствует началу работы привода,  $p_2$  – возникновению недопустимой нагрузки,  $p_3$  – вращению ротора,  $p_4$  – движению мембраны,  $p_5$  – превышению допустимого значения температуры ( $42\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $p_6$  – увеличению скорости движения мембраны (изоволюметрическое сокращение),  $p_7$  – возникновению недопустимой нагрузки,  $p_8$  – уменьшению скорости движения мембраны (медленное изгнание),  $p_9$  – ошибке в работе по недопустимой температуре,  $p_{10}$  – ошибке в работе по недопустимой нагрузке,  $p_{11}$  – окончанию движения мембраны (изгнание крови закончено),  $p_{12}$  – ошибке в работе ММ,  $p_{13}$  – обратному движению мембраны,

наполнению ИЖС,  $p_{14}$  – остановке ММ,  $p_{15}$  – возникновению недопустимой нагрузки,  $p_{16}$  – замедлению движения мембраны,  $p_{17}$  – окончанию процесса заполнения ИЖС.

Рассчитаем вероятность  $f$  того, что возникнет состояние  $p_{12}$  через переходы  $t_7$  и  $t_8$  в момент времени  $t$ . Используем метод счетчиков для переходов с ИЛИ-структурой [3]. Для данного случая  $f(t) = 1 - \prod_{l \in \Omega_{top}} [1 - f_l(t - \phi_l)]$ , где  $f_l(t) = \frac{X_l(t - \phi_l)}{\sum_{k \in \Phi_l} X_k(t - \phi_k)}$ . Таким образом,

получаем итоговую формулу

$$f(t) = 1 - \left[ 1 - \frac{\frac{t - \phi_{21}}{\phi_{21}}}{\frac{t - \phi_{11}}{\phi_{11}} + \frac{t - \phi_{12}}{\phi_{12}} + \frac{t - \phi_{13}}{\phi_{13}} + \frac{t - \phi_{14}}{\phi_{14}}} \right] \left[ 1 - \frac{\frac{t - \phi_{22}}{\phi_{22}}}{\frac{t - \phi_{11}}{\phi_{11}} + \frac{t - \phi_{12}}{\phi_{12}} + \frac{t - \phi_{13}}{\phi_{13}} + \frac{t - \phi_{14}}{\phi_{14}}} \right]$$

где  $\phi_{11}$  – время срабатывания перехода  $t_1$ ,  $\phi_{12}$  – время срабатывания перехода  $t_5$ ,  $\phi_{13}$  – время срабатывания перехода  $t_{10}$ ,  $\phi_{14}$  – время срабатывания перехода  $t_4$ ,  $\phi_{21}$  – время срабатывания перехода  $t_8$ ,  $\phi_{22}$  – время срабатывания перехода  $t_7$ .

Данные для расчета были получены в результате 100 пробных запусков ММ системы ВК. В процессе его работы фиксировались моменты времени, когда в системе возникали критические ошибки. После для каждого случая было рассчитано среднее значение времени срабатывания переходов по результатам запусков системы (в часах работы):  $\phi_{11} = 15831.579$ ,  $\phi_{12} = 15296.8$ ,  $\phi_{13} = 14247.913$ ,  $\phi_{14} = 14989.524$ ,  $\phi_{21} = 15066.652$ ,  $\phi_{22} = 14438.706$ . Для этих значений получаем вероятности несрабатывания переходов для каждого их 4 случаев  $f_{11} = 0.9962$ ,  $f_{21} = 0.9978$ ,  $f_{13} = 0.9976$ ,  $f_{14} = 0.9978$ , среднее итоговое значение вероятности невозникновения ошибки (безотказной работы) для них  $f = 0.9974$ . График  $f(t)$  вероятности возникновения ошибки (по оси Z) на промежутке времени в часах  $t = (11000, 16000)$  (по оси X) и при значениях времени срабатывания перехода в часах  $\phi_{11} = (11000, 16000)$  (по оси Y) приведен на рис. 2. Похожие графики были получены и при значениях  $\phi_{12}$ ,  $\phi_{13}$ ,  $\phi_{14}$  по оси Y.

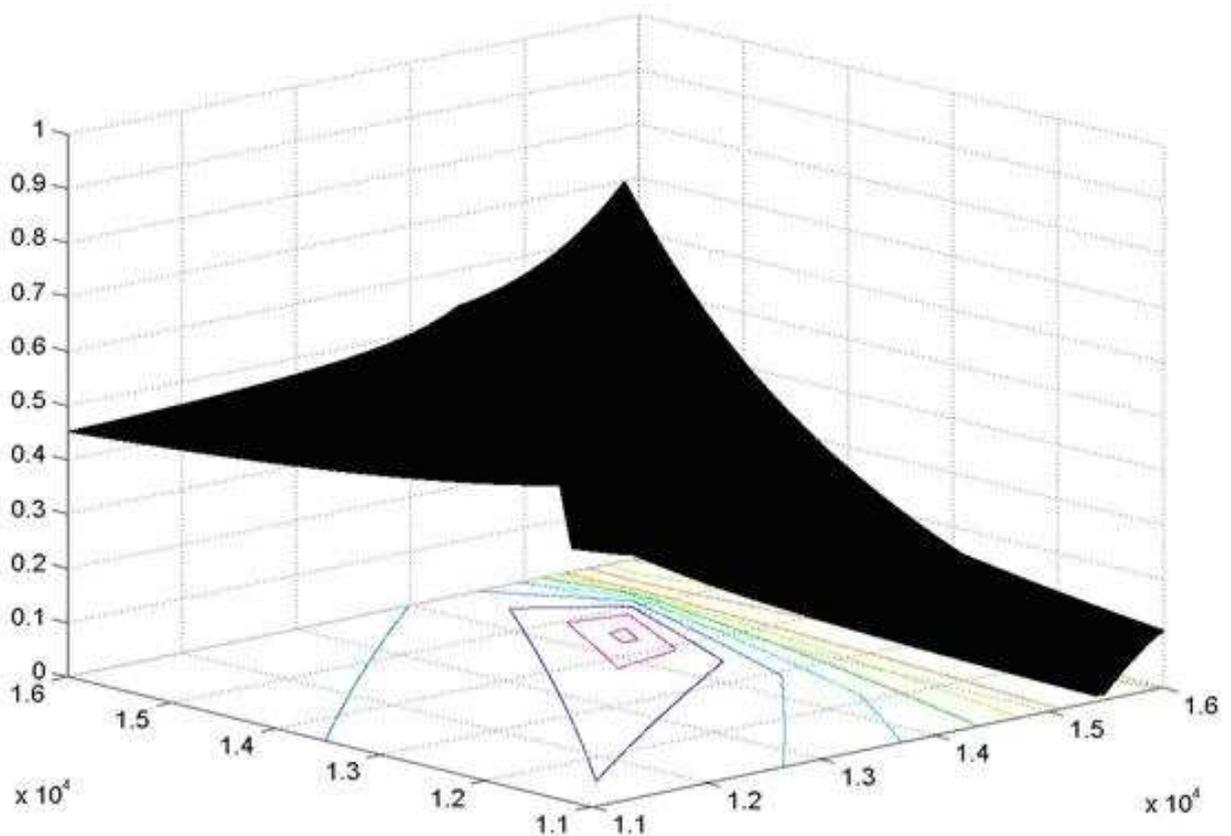


Рис. 2. График  $f(t)$  вероятности возникновения ошибки (по оси Z) на промежутке времени в часах  $t = (11000, 16000)$  (по оси X) и при значениях времени срабатывания перехода в часах  $\phi_{11} = (11000, 16000)$  (по оси Y)

Таким образом, по этим графикам можно оценить при каких парах значений времени работы и среднем времени до ошибки вероятность будет достаточно велика. Также удалось доказать высокую надежность рассматриваемого модуля искусственного желудочка сердца (величина вероятности безотказной работы  $f = 0.9974$ ) и применимость метода измерения надежности с применением счетчиков сети Петри.  
Список литературы

1. Морозов В.В. Имплантируемая система вспомогательного кровообращения на базе мехатронных модулей: монография. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 134 с.
2. Морозов В.В., Костерин А.Б., Новикова Е.А. Плавность динамических звеньев электромеханических приводов. – Владимир: ВлГУ, 1999. – 158 с.
3. Трефилов М.А., Морозов В.В., Жданов А.В. Расчет вероятности ошибки технической системы с использованием аппарата сетей Петри // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 7. – С. 26-30.
4. Isermann R. Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications. / R. Isermann // Annual Reviews in Control. – 2005. № 29. – P. 71-85.
5. Rodjk M., Jezernik K., Trlep M. Mechatronic Systems' Control Design Using Dynamic Emulation of Mechanical Loads // Automatica. – 2006. № 47. – P. 11-18.

Рецензенты:

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

Кульчицкий А.Р., д.т.н., профессор, зам. главного конструктора по испытаниям ООО «ВМТЗ», г. Владимир.