

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№4(16)
2021

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

Выходит 4 раза в год

ISSN 2658-4727

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО- ПРИБОРОСТРОЕНИИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Севастополь, 2021

Главный редактор

Копп В.Я., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Заместитель главного редактора

Филипович О.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Научный редактор

Бохонский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Ответственный секретарь

Майстришин М.М., к.т.н.
(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Вартанов М.В., д.т.н., проф.
(г. Москва)

Бахадиров Г.А., д.т.н., проф.
(г. Ташкент)

Доронина Ю.В., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Жмудь В.А., д.т.н., проф.,
(г. Новосибирск)

Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Пашков Е.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Песчанский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Петрешин Д.И., д.т.н., проф.
(г. Брянск)

Прейс В.В., д.т.н., проф.
(г. Тула)

Рзаев Р.Р., д.т.н., проф.
(г. Баку)

Балакин А.И., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Заморёнов М.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Рапацкий Ю.Л., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

- Бохонский А.И., Варминская Н.И.** Эквивалентные по энергоёмкости управления движением объектов 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Обжерин Ю.Е., Никитин М.М., Сидоров С.М., Федоренко С.Н.** Скрытая марковская модель системы контроля отказов технологической ячейки 12
- Заморёнов М.В., Флоря П.Н., Владимирова Е.С., Заморёнов И.М.** Анализ функционирования системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики в среде AnyLogic 26
- Доронина Ю.В.** Классификация требований при создании системы мониторинга каналов информационного обмена 38
- Осипов К.Н., Новиков В.В., Маврин С.А.** Точечное оценивание технических состояний машиностроительных изделий 50
- Заморёнов М.В., Федоренко С.Н., Малицкая А.А., Заморёнов И.М.** Имитационная модель контроля однокомпонентной системы с отключением и упреждающим восстановлением компонента 59

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Васютенко А.П., Заморёнова Д.В.** Прибор для сопряженного шлифования 68
- Филипович О.В., Невар Г.В., Волошина Н.А., Балакина Н.А.** Оценка влияния погрешности измерения на процесс сортировки по селективным группам 74
- Заморёнова Д.В., Васютенко А.П.** Моделирование статической характеристики соосной пневматической измерительной головки 82

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Филипович О.В., Камцев В.А.** Использование метода модифицированных периодограмм для обработки тестовых сигналов прототипа гарнитуры интерфейса мозг-компьютер 90

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

УДК 621.888.6

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПО ЭНЕРГОЕМКОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.²

Аннотация. Новому типу конструируемого оптимального управления (ускорения) поставлены в соответствие два эквивалентных по энергоемкости управления, которые обеспечивают (в сравнении с известным классическим управлением) достижение цели движения со снижением энергии.

Ключевые слова. Конструируемые управления, энергоёмкость управлений, условия эквивалентности преобразований, эквивалентные управления.

Введение. Применению теории оптимального управления движением объектов, колебаниям упругих систем посвящены классические работы [1–5] и другие. Вариационные методы, алгоритмы решения прямых и обратных [2] задач используются в современной теории синтеза оптимальных управлений. Однако решению полной обратной задачи вариационного исчисления (от функции – к функционалу) и до настоящего времени все еще не уделялось должного внимания.

В ряде исследований [7–12] показано, что конструирование оптимальных управлений переносным поступательным и вращательным движением объектов приводит к новым менее энергоемким типам управлений.

В [11] разработан алгоритм реверсионного принципа оптимальности (РПО) для синтеза управлений, не предполагающий предварительное задание критерия оптимальности. В работах [8–11] приведены примеры конструирования оптимальных управлений переносным движением абсолютно твердых и деформируемых систем. В современной технике при повышении производительности оборудования с упругими элементами (в робототехнике, например) применение управлений, обеспечивающих достижение в конечном состоянии абсолютного либо относительно покоя упругих объектов, обеспечивает повышение эффективности технологических процессов. Применение предложенных управлений связано с дополнительными исследованиями особенностей практической реализации с учетом характеристик приводов и математического обеспечения.

Цель исследований – получение эквивалентных по энергоемкости

управлений переносным движением (ускорений), которые обеспечивают практическое использование конструируемых управлений.

Ускорение (управление) в предельном случае может быть описано с использованием δ -функции Дирака $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau) dt = 1$, обладающей свойствами:

$$\delta(t - \tau) = \begin{cases} 0, & t \neq \tau; \\ 1, & t = \tau. \end{cases}$$

На практике δ -функцию можно приближенно заменить, например, прямоугольным либо синусоидальным импульсом достаточно малой ширины τ и большой интенсивности. Такие оптимальные управления будут оставаться эквивалентными по энергоемкости.

В работах [7–12] при реверсионном конструировании оптимального управления без предварительного задания критерия оптимальности для произвольной степени используемого полинома и движении из состояния покоя управление описывается согласно универсальной зависимости:

$$U_e = \frac{2L(n+2)}{T^2} \left(\frac{T-2t}{T} \right)^n, \quad (1)$$

где L – максимальное перемещение, T – время движения.

Из (1) следовали зависимости для скорости и перемещения:

$$V_e = \int U_e dt + C_1 \quad S_e = \int V_e dt + C_2 \quad (2)$$

$$V_e = \frac{L(n+2)}{T(n+1)} \left(1 - \left(\frac{T-2t}{T} \right)^{n+1} \right),$$

$$S_e = \frac{L}{2(n+1)} \left(\left(\frac{T-2t}{T} \right)^{n+2} + \frac{2nt}{T} + \frac{4t}{T} - 1 \right).$$

Классическое управление при $n = 1$ следует из зависимостей (1), (2):

$$U(t) = \frac{6L(n+2)}{T^2} \left(\frac{T-2t}{T} \right), \quad V(t) = \frac{3L}{2T} \left(1 - \left(\frac{T-2t}{T} \right)^2 \right),$$

$$S(t) = \frac{L}{4} \left(\left(\frac{T-2t}{T} \right)^3 + \frac{6t}{T} - 1 \right). \quad (3)$$

При исходных данных $L = 6$ м, $T = 2$ с $n=1$ вычислена энергия для реализации управления:

$$A_1 = 2 \int_0^{T/2} U(t)V(t)dt = 20,25 \text{ Дж.}$$

Для дальнейших исследований в качестве эталонного выбрано управление с $n = 5$, которому соответствуют аналитические зависимости:

$$U_1 = \frac{14L}{T^2} \left(\frac{T-2t}{T} \right)^5, \quad V_1 = \frac{7L}{6T} \left(1 - \left(\frac{T-2t}{T} \right)^6 \right),$$

$$S_1 = \frac{L}{12} \left(\left(\frac{T-2t}{T} \right)^7 + \frac{14t}{T} - 1 \right). \quad (4)$$

В этом случае энергия $A = 2 \int_0^{T/2} U_1 V_1 dt = 12,25 \text{ Дж.}$

Скорость в середине интервала движения $V_1 = \int_0^{T/2} U_1 dt = 3,5 \text{ м/с.}$

При $L = 1 \text{ м}$, $T = 1 \text{ с}$, $m = 1 \text{ кг}$ и $n \rightarrow \infty$ графики оптимального движения стремятся к своему предельному значению. На **Рис.1** изображены графики движения ($n = 1375$). Нельзя не отметить важную закономерность: ускорение (управление) стремится к двум импульсам (разгон и торможение), а скорость в интервале между действующими импульсами стремится к константе. В этом случае энергия для реализации движения принимает следующее минимальное значение:

$$A_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} 2 \int_0^{T/2} m U_e(t) V_e(t) dt = 1 \text{ Дж.}$$

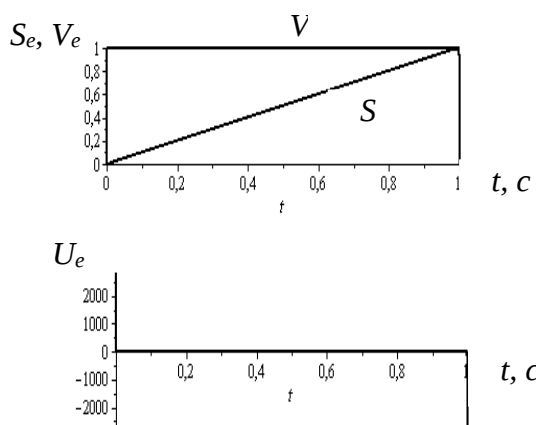


Рис.1 – Графики перемещения, скорости и ускорения (при $n = 1375$)

Эквивалентное управление в виде прямоугольных импульсов

При исходных данных ($V_0 = 3,5 \text{ м/с}$, $L = 6 \text{ м}$, $T = 2 \text{ с}$) и неизвестных параметрах U_0 из графиков управления для перемещения и скорости следуют уравнения:

$$\begin{aligned} V_0\tau + V_0(T - 2\tau) - L &= 0, \\ U_0\tau - \int_0^{T/2} V_e(t)dt &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

которые преобразуются к виду

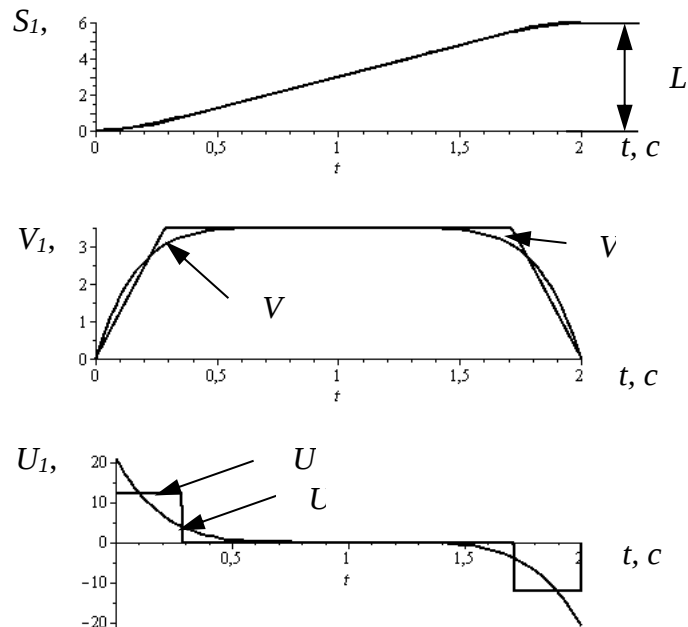
$$\begin{aligned} V_0(T - \tau) - L &= 0, \\ U_0\tau - \frac{1,667L}{T} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Из системы уравнений (6) получено: $\tau = 0,2857$ с; $U_0 = 12,25$ м/с².

Выражения для скорости и перемещения находятся из зависимостей:

$$V_e = \int U_e(t)dt + C_1, \quad S_e = \int V_e(t)dt + C_2,$$

где $C_1 = 0$, $C_2 = 0$. Графики S_1 и S_2 , V_1 и V_2 , U_1 и U_2 совмещены и изображены на **Рис.2**.



**Рис.2 – Графики перемещения, скорости и ускорения:
 S_1 , V_1 , U_1 – эталонное управление ($n = 5$); S_2 , V_2 , U_2 – эквивалентное
управление (прямоугольные импульсы)**

Замена эталонного управления эквивалентным не только упрощает возможную его практическую реализацию, но и обеспечивает требуемую точность воспроизведения оптимального движения; при этом энергетические затраты на управление не изменяются и остаются меньше чем при $n = 1$.

Важными показателями кроме энергии являются инварианты эквивалентных преобразований:

1. Площадь части графика управления U_1 ($n = 5$):

$$\int_0^{T/2} U_1(t) dt = \frac{1,667L}{T};$$

2. Площадь графика V_1 :

$$\int_0^T V_1(t) dt = L.$$

Для численного примера при замене непрерывного управления эквивалентным, как и ранее, приняты исходные данные: $m = 1$ кг, $L = 6$ м, $T = 2$ с. График управления задан с использованием функции Хевисайда, которая имеет вид:

$$U_2(t) = U_0(\text{Heaviside}(t) - \text{Heaviside}(t - \tau) - \text{Heaviside}(t - t_1) + \text{Heaviside}(t - T)), \quad (7)$$

где $U_0 = 12,25$ м/с², $\tau = 0,2857$ с, $t_1 = 1,7143$ с.

Эквивалентное синусоидальное управление

Импульсы для эквивалентного управления типа разгон-торможение заданы в виде:

$$\begin{aligned} U_3(t) &= B \sin\left(\frac{\pi}{\tau} t\right), \quad \tau > t \geq 0, \\ U_3(t) &= -B \sin\left(\frac{\pi}{\tau} t\right), \quad T > t \geq T - \tau, \end{aligned} \quad (8)$$

где B, τ – константы, подлежащие определению из условий эквивалентности управлений.

Из (8) следуют выражения для скорости и перемещения

$$V_3 = \int U_3(t) dt + C_1, \quad S_3 = \int V_3(t) dt + C_2,$$

где с учетом $C_1 = B\tau/\pi$, $C_2 = 0$ и

$$V_3(t) = \frac{B\tau}{\pi} \left(L - \cos\left(\frac{\pi}{\tau} t\right) \right), \quad S_3(t) = \frac{B\tau}{\pi} \left(t - \frac{\tau}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} t\right) \right). \quad (9)$$

Используются условия:

1. Импульс эквивалентного управления приравнивается импульсу эталонного (при $n = 5$):

$$\int_0^{T/2} U_1(t) dt = \int_0^{\tau} U_3(t) dt, \quad (10)$$

т.е. $2 \frac{B\tau}{\pi} - \frac{7L}{T} = 0.$

2. Перемещение за время $T/2$ должно соответствовать перемещению

при эталонном управлении, т.е. $S(T/2) = L/2$,

$$\frac{1}{2}B\tau^2 + 2\frac{B\tau}{\pi}\left(\frac{T}{2} - \tau\right) - \frac{L}{2} = 0. \quad (11)$$

При $L = 6$ м, $T = 2$ с из системы уравнений (10), (11) получено: $B = 8,2588$ м/с²; $\tau = 0,6657$ с.

Здесь энергия: $A_3 = 2\int_0^{T/2} U_3 V_3 dt = 12,25$ Дж.

Скорость, достигнутая за время действия импульса разгона, $V_3 = \int_0^{\tau} U_3(t) dt = 3,5$ м/с.

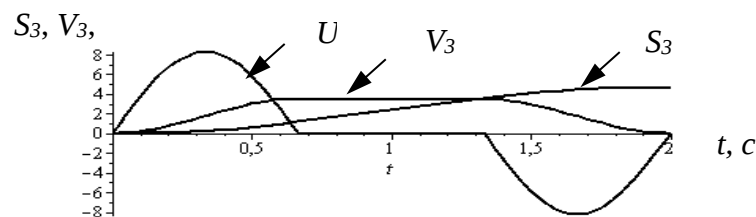


Рис.3 – Графики эквивалентного управления (синусоидальные импульсы)

Для графического изображения движения использована, как и ранее, использована функция Хевисайда

$$U_3(t) = A \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) (H(t) - H(t - \tau) - H(t - t_1) + H(t - T)), \quad (12)$$

где $H(t)$ – функция Хевисайда.

Графики перемещения, скорости и ускорения совмещены на **Рис.3**. Графики ускорения (управления) по внешнему виду существенно отличаются, но графики перемещения S_3 и скорости V_3 близки к эталонному, и цель движения достигается.

Выводы. Предложены условия и алгоритм проектирования новых управлений, которые могут найти применение как в случае абсолютно твердых объектов, так и деформируемых систем. Замена реверсионно найденных оптимальных управлений движением объектов эквивалентными по энергоемкости управлениями облегчает их практическое использование в различных областях техники.

В природе существует широкий класс управлений, которые, по сравнению с известными управлениями, приводят к экономии энергии и могут быть аппроксимированы для удобства их практической реализации.

Библиографический список

1. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. –

- М.: Наука, 1968. – 476 с.
2. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
 3. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. школа, 1982. – 116 с.
 4. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 236 с.
 5. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
 6. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568с.
 7. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов / А.И. Бохонский // Фундаментальные основы механики: матер. междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 38 – 41.
 8. Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Механика, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 64 – 69.
 9. Бохонский А.И. Конструирование оптимального управления движения объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: НИЦ МС, 2016. – С.70–76.
 10. Бохонский А.И. Оптимальность конструируемых управлений перемещением объектов / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин // Научно-технический журнал. – Гос. университет –УНПК, 2017. – С. 31 – 38.
 11. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
 12. Бохонский А.И. Оценка энергопотребления для оптимального управления движением объекта (Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // ICMTMTE IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. (<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044093>).

Bibliograficheskij spisok

1. Krasovskij N.N. Teoriya upravleniya dvizheniem / N.N. Krasovskij. – М.: Nauka, 1968. – 476 p.
2. Krut'ko P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemyh sistem: linejnye modeli / P.D. Krut'ko. – М.: Nauka, 1987. – 304 p.
3. Karnovskij I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemyh sistem / I.A. Karnovskij, YU.M. Pochtman. – К.: Vyssh.

- shkola, 1982. – 116 p.
4. Troickij V.A. Optimal'nye processy kolebaniy mekhanicheskikh sistem / V.A. Troickij. – L.: Mashinostroenie, 1976. – 236 p.
 5. Chernous'ko F.L. Upravlenie kolebaniyami / F.L. Chernous'ko, P.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 p.
 6. Butkovskij A.G. Metody upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami / A.G. Butkovskij. – M.: Nauka, 1975. – 568 p.
 7. Bokhonsky A.I. Energoemkost' upravleniya peremeshcheniem ob"ektov / A.I. Bokhonsky // Fundamental'nye osnovy mekhaniki: mater. mezhdunar. nauch.-praktich. konf. – Novokuzneck: NIC MS, 2017. – P. 38 – 41.
 8. Bokhonsky A.I. Konstruirovanie upravlyaemogo dvizheniya ob"ekta / A.I. Bokhonsky, A.I. Ryzhkov // Mekhanika, avtomatika i robototekhnika: mater. mezhdunar. nauch.-praktich. konf. – Novokuzneck: NIC MS, 2017. – P. 64 – 69.
 9. Bokhonsky A.I. Konstruirovanie optimal'nogo upravleniya dvizheniya ob"ektov kak absolyutno tverdyh i deformiruemyh tel / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: NIC MS, 2016. – P.70–76.
 10. Bokhonsky A.I. Optimal'nost' konstruiruemyh upravlenij peremeshcheniem ob"ektov / A.I. Bokhonsky, M.M. Majstrishin // Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – Gos. universitet –UNPK, 2017. – P. 31 – 38.
 11. Bokhonsky A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti / A.I. Bokhonsky. – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2016. – 174 p.
 12. Bokhonsky A.I. Ocenka energopotrebleniya dlya optimal'nogo upravleniya dvizheniem ob"ekta (Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // ICMTMTE IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. (<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044093>).

¹*Бохонский Александр Иванович, д.т.н., профессор, bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Варминская Наталья Ивановна, к.т.н., доцент, заведующая. кафедрой, nvarminska@gmail.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училища имени П.С. Нахимова*

ENERGY EQUIVALENT OBJECT MOTION CONTROL

A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya

The new type of the designed optimal control (acceleration) is associated with two controls equivalent in energy intensity, which provide (in comparison

with the well-known classical control) the achievement of the goal of motion with a decrease in energy.

Keywords: constructed controls, control energy intensity, conditions of equivalence of transformations, equivalent controls.

Bokhonsky Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Varminskaya Natalia Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, nvarminska@gmail.com, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

СКРЫТАЯ МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СКРЫТЫХ ОТКАЗОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

Обжерин Ю.Е.¹, Никитин М.М.², Сидоров С.М.³, Федоренко С.Н.⁴

Аннотация. Полумарковские и скрытые марковские модели – широко распространенный инструмент для моделирования стохастических систем. Коды состояний полумарковской модели содержат важную информацию, необходимую для описания функционирования системы, но получить ее полностью не всегда возможно. В частности, можно получить некоторый сигнал (информацию), связанный с полумарковским процессом. В этом случае состояния полумарковской модели не наблюдаются (скрываются). На практике мы имеем дело с определенным вектором сигналов, полученных в результате работы системы. Следовательно, возникают проблемы корректировки модели, анализа динамики моделируемой системы и прогнозирования ее состояний на основе полученного вектора сигналов. Описанные выше проблемы могут быть решены с помощью аппарата теории скрытых марковских моделей. В данной работе скрытая марковская модель строится на основе полумарковской модели системы управления скрытыми отказами технологической ячейки. Он используется для решения задач оценки характеристик полумарковской модели, анализа ее динамики и прогнозирования состояний на основе вектора сигналов, полученных в процессе работы системы. Построенная скрытая марковская модель позволяет расширить возможности использования полумарковской модели при наличии в ней переменных, не наблюдаемых напрямую.

Ключевые слова. Технологическая ячейка, полумарковская модель контроля, скрытая марковская модель, алгоритм фазового укрупнения, скрытый отказ, вектор сигналов, оценка характеристик.

Технический контроль [1–5] – важная часть системы менеджмента качества продукции на производстве. Быстрое развитие технологий, рост требований к качеству и надежности продукции привели к значительному удорожанию технического контроля. Поэтому важно снизить стоимость технического контроля, повысить его эффективность.

Решению этой проблемы способствуют математические модели технического контроля. Эти модели позволяют анализировать эффективность различных стратегий управления, определять оптимальные сроки их реализации.

Одна из задач технического контроля – своевременное обнаружение сбоев в производственном процессе. Интересно насколько возможно обнаружение при двух типов отказов [5]: явные и скрытые.

Скрытый отказ – это отказ, который не обнаруживается визуально или стандартными методами и средствами контроля и диагностики, но обнаруживается при техническом обслуживании или специальными методами диагностики.

Марковские и полумарковские процессы широко используются для моделирования различных систем, в частности систем контроля [1, 2, 6, 8–10].

В процессе функционирования системы, для которой построена полумарковская модель, необходимо оценить, насколько построенная модель согласуется с данными, полученными в процессе функционирования системы, уточнить их, проанализировать работу системы и прогнозировать его состояние на основе полученного вектора сигналов. Скрытые марковские модели [12–20] позволяют решить эти проблемы.

В процессе функционирования системы, для которой построена полумарковская модель, не всегда возможно при изменении ее состояний полностью получить всю информацию, содержащуюся в кодировке состояний, но можно получить некоторую информацию (сигнал) связанные с состояниями вложенной цепи Маркова (полумарковский процесс). Например, в фазовом состоянии полумарковской модели для каждого элемента системы указано, находится ли он в рабочем состоянии или на восстановлении, а во время работы системы возможно получение сигнала только о количестве исправных элементов. В этих случаях состояния полумарковской модели можно считать скрытыми (ненаблюдаемыми), а для решения указанных задач использовать аппарат теории скрытых марковских моделей.

В работе [10] построена полумарковская модель с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний системы контроля скрытых отказов технологической ячейки (ТЯ).

Цель исследований – является разработка скрытой марковской модели системы контроля скрытых отказов технологической ячейки. Для этого сначала строится укрупнённая полумарковская модель системы, используя алгоритм стационарного фазового укрупнения [1, 2]. На основе укрупнённой модели строится СММ системы контроля. С помощью построенной СММ проводится оценка характеристик и прогнозирования состояний укрупнённой модели на основе полученного вектора сигналов.

Для перехода к конечному пространству состояний в полумарковской модели используется алгоритм стационарного фазового укрупнения, предложенный В.С. Королюка, А.Ф. Турбина в [6].

Опишем, следуя [10], полумарковскую модель системы контроля скрытых отказов технологической ячейки (ТЯ). Рассматривается система S ,

состоящая из ТЯ, выполняющей определенные функции и аппаратуры контроля её работоспособности. Система функционирует следующим образом. В начальный момент времени ТЯ приступает к работе, контроль включен. Время безотказной работы ТЯ до скрытого отказа – случайная величина (СВ) α с ФР $F(t) = P\{\alpha \leq t\}$ и плотностью распределения (ПР) $f(t)$. Контроль ТЯ проводится через случайное время δ с ФР $R(t) = P\{\delta \leq t\}$ и ПР $r(t)$. Отказ ТЯ обнаруживается только в результате проведения контроля (скрытый отказ), на время проведения контроля функционирование ТЯ приостанавливается. Длительность проведения контроля ТЯ – СВ γ с ФР $V(t) = P\{\gamma \leq t\}$ и ПР $v(t)$. Время восстановления ТЯ после обнаружения отказа СВ β с ФР $G(t) = P\{\beta \leq t\}$ и ПР $g(t)$. На период восстановления ТЯ контроль приостанавливается, после восстановления все свойства ТЯ обновляются. Предполагается, что СВ α , β , δ , γ независимы и имеют конечные математические ожидания.

Для построения полумарковской модели системы S в работе [10] используется полумарковский процесс $\xi(t)$ с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний E [7, 9-11]:

$$E = \{111, 2\hat{1}0x, 211x, 101x, 2\hat{0}0, 222\} \quad (1)$$

Рассмотрим содержательный смысл кодов состояний:

- 111 – ТЯ восстановлена после скрытого отказа и приступила к работе, контроль включен;
- $2\hat{1}0x$ – начался контроль, ТЯ работоспособна и отключена, до наступления скрытого отказа ТЯ осталось время $x > 0$;
- 211x – проведен контроль, работоспособная ТЯ продолжила работу, до наступления отказа ТЯ осталось время $x > 0$;
- 101x – ТЯ отказала, до начала контроля осталось время $x > 0$;
- $2\hat{0}0$ – начался контроль, ТЯ, находящаяся в отказе, отключена;
- 222 – проведен и приостановлен контроль, обнаружен скрытый отказ ТЯ, началось её восстановление.

Временная диаграмма функционирования системы S изображена на **Рис.1**. На временной диаграмме ломаной линией показан скрытый отказ ТЯ, а жирной линией – отключение ТЯ или приостановление отсчета времени контроля.

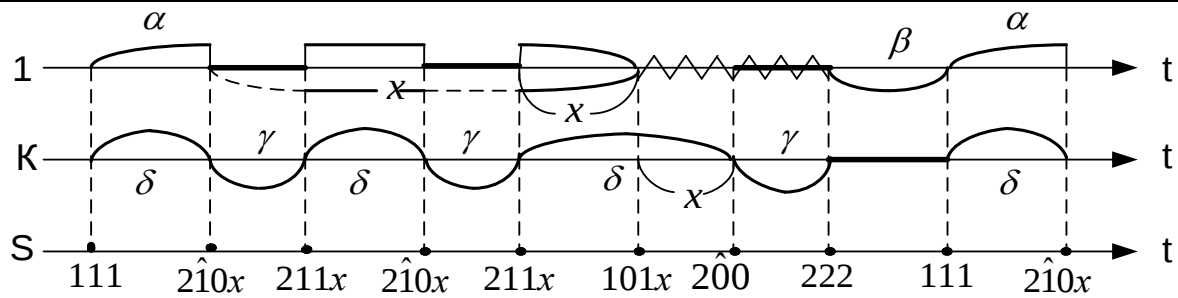


Рис.1 – Временная диаграмма функционирования системы контроля

В работе [10] показано, что стационарное распределение ВЦМ полумарковского процесса $\xi(t)$ имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \rho_0 = \rho(111) = \rho(222) = \rho(200), \\ \rho(211x) = \rho(2\hat{1}0x) = \rho_0 \int_0^{\infty} h_r(t) f(x+t) dt, \\ \rho(101x) = \rho_0 \int_0^{\infty} v_r(z, x) f(z) dz, \end{cases} \quad (2)$$

где $h_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} r^{*(n)}(t)$ – плотность функции восстановления $H_r(t)$ [1]

процесса восстановления, порожденного СВ δ , $r^{*(n)}(t)$ – n -кратная свертка

плотности распределения $r(t)$; $v_r(z, x) = r(z+x) + \int_0^z r(z+x-s)h_r(s)ds$ –

плотность распределения прямого остаточного времени того же процесса восстановления [1]; постоянная ρ_0 находится из условия нормировки.

С целью упрощения модели системы S , построим укрупнённую полумарковскую модель системы, используя алгоритм стационарного фазового укрупнения, предложенный в [6, 7]. Фазовое пространство состояний E исходной модели расцепим на $N=6$ классов:

$$\begin{aligned} E_1 = \{111\}, E_2 = \{2\hat{1}0x\}, E_3 = \{211x\}, \\ E_4 = \{101x\}, E_5 = \{2\hat{0}0x\}, E_6 = \{222\}, \end{aligned} \quad (3)$$

каждый из которых «склеивается» в одно состояние укрупнённой модели.

Фазовое пространство состояний $\hat{E}$ укрупнённой модели имеет вид:

$$\hat{E} = \{111, 2\hat{1}0, 211, 101, 2\hat{0}0, 222\}. \quad (4)$$

Физический смысл состояний укрупнённой модели следует из содержательного смысла кодов состояний исходной модели.

Определим вероятности перехода ВЦМ $\hat{p}_{kr}$ и средние времена пребывания в состояниях $\hat{m}_k$ укрупнённой модели, которые согласно [6, 7] находятся по формулам:

$$\hat{p}_{kr} = \int_{E_k} \rho(de) P(e, E_r) / \rho(E_k), \quad k, r = \overline{1, N}, \quad (5)$$

$$\hat{m}_k = M \hat{\theta}_k = \int_{E_k} \rho(de) m(e) / \rho(E_k), \quad k, r = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где $\rho(de)$ – стационарное распределение ВЦМ, определяемое формулами (1), $P(e, E_r)$ – вероятности перехода ВЦМ, $m(e)$ – средние времена пребывания в состояниях исходной модели.

Используя формулы (5), (2) и полумарковскую модель системы S , приведенную в [10], найдем вероятности перехода ВЦМ укрупненной модели, которые будут использованы при построении скрытой марковской модели:

$$\begin{aligned} \hat{p}_{211}^{210} &= \int_0^\infty \bar{F}(t) r(t) dt, \hat{p}_{111}^{101} = \int_0^\infty \bar{R}(t) f(t) dt, \hat{p}_{210}^{211} = \hat{p}_{101}^{200} = \hat{p}_{200}^{220} = \hat{p}_{222}^{111} = 1, \\ \hat{p}_{211}^{210} &= 1 - \frac{\int_0^\infty R(z) f(z) dz}{\int_0^\infty H_r(t) f(t) dt}, \quad \hat{p}_{211}^{101} = \frac{\int_0^\infty R(z) f(z) dz}{\int_0^\infty H_r(t) f(t) dt}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $H_r(t) = \sum_{n=1}^\infty F^{*(n)}(t)$ – функция восстановления [1].

Используя формулу (6), определим средние времена пребывания в состояниях укрупненной модели:

$$\begin{aligned} \hat{m}_{111} &= \int_0^\infty \bar{F}(t) \bar{R}(t) dt, \quad \hat{m}_{211} = \frac{\int_0^\infty \bar{F}(z) R(z) dz}{\int_0^\infty H_r(t) f(t) dt}, \\ \hat{m}_{101} &= M \delta \left[1 + \int_0^\infty H_r(t) f(t) dt \right] - M_\alpha, \quad \hat{m}_{110} = \hat{m}_{200} = M \gamma. \end{aligned} \quad (8)$$

Перейдем к построению скрытой марковской модели на основе укрупнённой полумарковской модели.

Пусть $\{X_n, n=1,2,\dots\}$ – ВЦМ укрупнённой модели, вероятности переходов которой определяются формулами (7). В начальный момент времени укрупненная модель находится в состоянии 111.

Предположим, что при функционировании системы S состояния ВЦМ укрупненной модели не наблюдаются (скрытые состояния), а наблюдаются только сигналы от состояний системы. Введём следующее множество J сигналов:

$$J = \{1, k, \bar{k}, o\},$$

где

- 1 – ТЯ восстановлена после скрытого отказа и начала работать;
- k – начался контроль состояния ТЯ;
- $\bar{k}$ – закончился контроль ТЯ;
- o – наступил скрытый отказ, который не обнаружен.

Рассмотрим связь между состояниями ВЦМ укрупненной модели и сигналами, т.е. определим функцию связи $R(s|x)$ [12, 13]:

$$R(s|x) = P(S_n = s | X_n = x), \quad x \in \hat{E}, s \in J, \sum_{s \in J} R(s|x) = 1, \quad (9)$$

где S_n – n -ый сигнал.

Функция $R(s|x)$ связи состояний ВЦМ укрупненной модели с сигналами представлена в Таблице 1.

Таблица 1. – Функция связи $R(s|x)$ состояний ВЦМ укрупненной модели с сигналами

Сигнал, s Состояние, x	$s=1$	$s=k$	$s=\bar{k}$	$s=o$
111	1	0	0	0
200	0	1	0	0
211	0	0	1	0
101	0	0	0	1
200	0	1	0	0
222	0	0	1	0

Следуя [12, 13], перейдем к анализу характеристик укрупненной полумарковской модели на основе построенной скрытой марковской модели.

Пусть $\bar{S}^n = (S_1, S_2, \dots, S_n)$ – случайный вектор первых n сигналов. Для полученного вектора сигналов $\bar{s}_n = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ пусть $\bar{s}_k = (s_1, s_2, \dots, s_k)$, $k \leq n$. Требуется оценить характеристики ВЦМ укрупненной (скрытой) модели на основе полученного вектора сигналов $\bar{s}_n$. Предполагается, что в начальный момент времени модель находится в состоянии 1.

Введём функции $F_k(i)$ (прямые переменные) [12, 13]:

$$F_k(i) = P(S^k = \bar{s}_k, X_k = i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Для этих функций справедлива следующая рекуррентная формула [12, 13]:

$$F_k(i) = R(s_k | i) \sum_j F_{k-1}(j) P_j^i, \quad F_1(i) = R(s_1 | i) p_i, \quad (11)$$

где P_j^i – вероятности перехода ВЦМ укрупнённой модели, определённые формулами (7), (p_i) – распределение начального состояния ВЦМ.

Рассмотрим также функции $B_k(i)$ (обратные переменные) [12, 13]:

$$B_k(i) = P(S_{k+1} = s_{k+1}, \dots, S_n = s_n | X_k = i), \quad k = \overline{1, n-1},$$

для которых имеет место рекуррентная формула [12, 13]:

$$B_k(i) = \sum_j R(s_{k+1} | j) B_{k+1}(j) P_i^j, \quad B_{n-1}(i) = \sum_j P_i^j R(s_n | j).$$

Функции $F_k(i)$, $B_k(i)$ играют важную роль при использовании скрытых марковских моделей для анализа функционирования систем.

Перейдем к анализу динамики укрупненной полумарковской модели на основе построенной скрытой марковской модели.

Рассмотрим систему S , у которой перед началом её функционирования принято, что величина α обладает экспоненциальным законом распределения и $M\alpha = 15,0$ ч, величина δ – распределением Эрланга II порядка с $M\delta = 10,0$ ч. Величины β и γ принимаются постоянными, равными 2,5 и 3,0 часа соответственно.

Предположим, что в результате функционирования системы S получен следующий вектор сигналов:

$$\bar{s}_{30} = (1, k, \bar{k}, k, \bar{k}, k, \bar{k}, k, \bar{k}, o, k, \bar{k}, 1, o, k, \bar{k}, 1, k, \bar{k}, k, \bar{k}, k, \bar{k}, k, \bar{k}, o, k, \bar{k}), \\ n=30.$$

Рассмотрим задачи по оценке характеристик скрытой марковской модели с учетом введенных параметров.

1. Определим вероятности состояний скрытой модели в момент испускания 30-го сигнала. Воспользуемся формулой [12, 13]:

$$P(X_n = i | \bar{S}^n = \bar{s}_n) = \frac{F_n(i)}{\sum_j F_n(j)}. \quad (12)$$

В результате получаем, что на 30-ом шаге укрупнённая модель с вероятностью 1 находилась в состоянии 222. Для состояний 111, 210, 211, 101, 200 эта вероятность равна нулю.

2. Найдём вероятности, с которыми скрытая модель осуществит переход в состояния на следующем 31-ом шаге. Для этого используем формулу [12, 13]:

$$P(X_{n+1} = j | \bar{s}_n) = \sum_i P(X_n = i | \bar{s}_n) P_i^j. \quad (13)$$

Получаем следующие вероятности перехода скрытой модели на 31-ом шаге: в состояние 111 с единичной вероятностью и во все остальные – с нулевой.

3. Определим вероятности появления сигналов на следующем 31-ом шаге, применим формулу [4,5]:

$$P(S_{n+1} = s_{n+1} | \bar{s}_n) = \sum_i P(X_{n+1} = i | \bar{s}_n) R(s_{n+1} | i), \quad (14)$$

при этом используется формула (13).

Получаем, что вероятность появления сигнала 0 на 31-м шаге равна 1, остальных сигналов 0.

4. Найдём вероятность появления (испускания) полученного вектора сигналов $\bar{s}_{30}$.

Для этого можно использовать формулы [12, 13]:

$$P(\bar{S}^n = \bar{s}_n) = \sum_i F_n(i) = \sum_i R(s_1 | i) B_1(i) p_i, \quad (15)$$

а также

$$P(\bar{S}^n = \bar{s}_n) = \sum_i F_k(i) B_k(i) \quad (16)$$

при любом фиксированном k .

Вероятность появления полученного вектора сигналов $\bar{s}_{30}$ равна 0,00087.

5. Прогнозирование состояний скрытой модели по полученному вектору сигналов.

На основании полученного вектора сигналов $\bar{s}_{30}$ необходимо найти наиболее вероятные состояния скрытой модели на переходах. Для решения этой задачи используется формула [12, 13]:

$$P(X_k = i | \bar{S}^k = \bar{s}_k) = \frac{F_k(i) B_k(i)}{\sum_j F_k(j) B_k(j)}. \quad (17)$$

Таким образом, необходимо найти i , которое максимизирует выражение $F_k(i) B_k(i)$.

В **Таблице 2** указаны наиболее вероятные состояния скрытой модели на указанных в ней переходах и вероятности этих состояний.

Таблица 2. – Наиболее вероятные состояния скрытой модели на переходах

Номер перехода	1	7	11	17	22	26	29
Наиболее вероятное состояние	111	211	211	$2\hat{0}0$	$2\hat{1}0$	$2\hat{1}0$	$2\hat{0}0$
Вероятность состояния	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Решетчатая диаграмма первых 12 полученных сигналов изображена на **Рис.2**.

Наиболее вероятные состояния для вектора полученных сигналов выделены жирной линией. Обратите внимание, что для всех этих состояний вероятность возникновения унитарна. Тонкими линиями соединены другие возможные состояния, которые система могла бы достичь без информации о векторе сигналов.

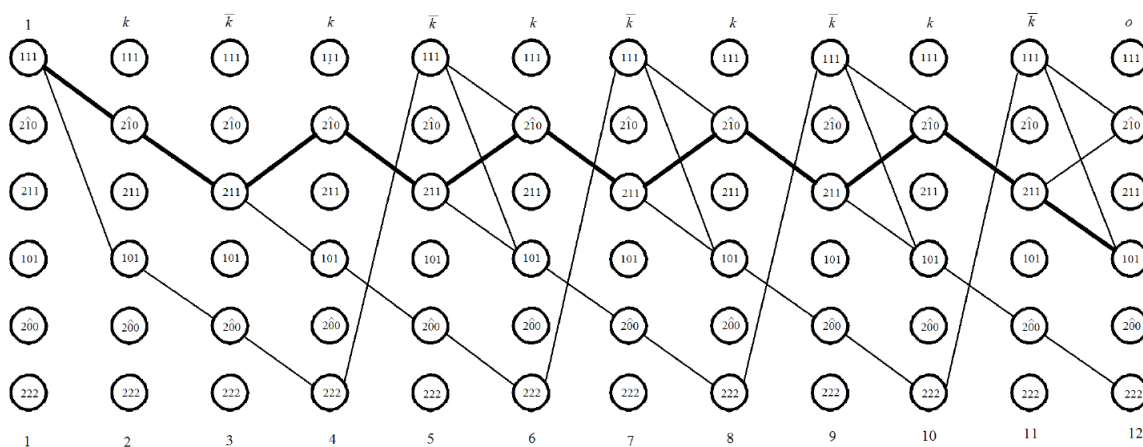


Рис.2 – Решетчатая диаграмма функционирования системы контроля

Для нахождения наиболее вероятной цепочки состояний укрупненной модели можно использовать алгоритм Витерби [12, 13].

При проектировании сложных технических объектов необходимо учитывать множество факторов, влияющих на надежность.

Технический контроль – важная часть управления качеством продукции на производстве. Одна из задач технического контроля – своевременное обнаружение сбоев в производственном процессе. Для построения моделей систем управления часто используются полумарковские процессы.

При работе системы, для которой построена полумарковская модель, необходимо оценить, насколько построенная модель согласуется с данными, полученными в процессе функционирования системы, уточнить их, проанализировать работу системы и спрогнозировать ее состояние на основе полученного вектора сигналов. Теория скрытых марковских моделей может успешно применяться для решения подобных задач.

В статье на основе полумарковской модели системы контроля скрытых отказов технологической ячейкой построена СММ системы контроля. Возможность построения скрытой марковской модели обеспечивается наличием вложенной цепи Маркова в полумарковском процессе. СММ используется для оценки характеристик системы управления и прогнозирования ее состояний на основе полученного вектора сигналов.

Отметим, что системы компьютерной математики позволяют эффективно находить рекуррентные функции и оценки характеристик СММ, состояния которых скрыты.

В дальнейшем предполагается использовать рассмотренный в работе подход для анализа работы многокомпонентных систем с учетом наличия систем управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 19-01-00704а).

Библиографический список

1. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен, пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
2. Beichelt, F. Reliability and Maintenance: Networks and System / F. Beichelt, P. Tittmann. – New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. – 344 p.
3. Smithson H. System Maintenance Using Several Imperfect Repairs Before a Perfect Repair. Statistics / H. Smithson, J. Sarkar // Optimization & Information Computing, Vol.9 (1), 2021. – P. 176-188.
4. Beichelt F. Advances in stochastic modelling for maintenance / F. Beichelt // Proceedings of the 4th International Conference on Applied Operational Research, Lecture Notes in Management Science, Vol.4, 2012. – P. 292–299.
5. Чупырин В.Н. Технический контроль в машиностроении. Справочник проектировщика / В.Н. Чупырин, А.Д. Никифоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 512 с.
6. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин – К.: Наук. Думка, 1982. – 236 с.

7. Korolyuk V.S. Stochastic Models of Systems / V.S. Korolyuk, V.V. Korolyuk. – Dordrecht: Springer Science+Business Media, 1999. – 185 p.
8. Grabski, F. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance / F. Grabski. – Gdynia, Poland, Elsevier Science, 2014. – 270 p.
9. Obzherin, Y.E. Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures / Y.E. Obzherin, E.G. Boyko. – London, Elsevier Academic Press, 2015, 212 p.
10. Obzherin, Y.E. Analysis of the reliability and efficiency of the technical system with preemptive recovery of a component / Y.E. Obzherin, E.G. Boyko, S.N. Fedorenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol.709, No.3, 2020, Art. No. 033029.
11. Obzherin, Y.E. Reliability of the information system with intermediate storage devices / Y.E. Obzherin, S.M. Sidorov, M.M. Nikitin // CCIS, vol.919, 2018. – P. 432–444.
12. Rabiner L.R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition / L.R. Rabiner // Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 2, 1989. – P. 257–286.
13. Ross S.M. Introduction to Probability Models, 9th ed. / S.M. Ross. – USA: Elsevier Academic Press, 2006, – 800 p.
14. Kobayashi H. Probability, Random Processes, and Statistical Analysis: Applications to Communications, Signal Processing, Queueing Theory and Mathematical Finance / H. Kobayashi, B. Mark, W. Turin. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011, – 812 p.
15. Capp'e O. Inference in Hidden Markov Models / O. Capp'e, E. Moulines, T. Ryden. – New York: Springer Sci.+Business Media, 2005, – 653 p.
16. Durand J.-B., Gaudoin O. Software reliability modelling and prediction with hidden Markov chains // Stat. Model. - An Int. J., Vol. 5(1), 2005. – P. 75–93.
17. Archer G.-E.B. Titterington D.M. Parameter estimation for hidden Markov chains / G.-E.B. Archer // Stat. Plann. Infer., Vol.108(1–2), 2002. – P.365–390.
18. Обжерин Ю.Е. Скрытая марковская модель на основе суперпозиции двух процессов восстановления / Ю.Е. Обжерин, С.М. Сидоров, М.М. Никитин, С.Г. Глеч // Автоматика и телемеханика, № 6, 2021. – С. 80–101.
19. Obzherin Y.E. Hidden Markov model of information system with component-wise storage devices / Y.E. Obzherin, S.M. Sidorov, M.M. Nikitin // Lect. Notes Comput. Sci., Vol. 11965, 2019. –P.354–364.
20. Сидоров С.М. Скрытая марковская модель двухкомпонентной системы с групповым мгновенно пополняемым резервом времени / С.М. Сидоров // Информационные технологии, Т. 27, № 2, 2021. – С. 64–71.

Bibliograficheskiy spisok

1. Bajhel't F. Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskij podhod / F. Bajhel't, P. Franken, per. s nem. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 392 s.
2. Beichelt, F. Reliability and Maintenance: Networks and System / F. Beichelt, P. Tittmann. – New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. – 344 p.
3. Smithson H. System Maintenance Using Several Imperfect Repairs Before a Perfect Repair. Statistics / H. Smithson, J. Sarkar // Optimization & Information Computing, Vol.9 (1), 2021. – P. 176-188.
4. Beichelt F. Advances in stochastic modelling for maintenance / F. Beichelt // Proceedings of the 4th International Conference on Applied Operational Research, Lecture Notes in Management Science, Vol.4, 2012. – P. 292–299.
5. CHupyrin V.N. Tekhnicheskij kontrol' v mashinostroenii. Spravochnik proektirovshchika / V.N. CHupyrin, A.D. Nikiforov. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 512 s.
6. Korolyuk V.S. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin – K.: Nauk. Dumka, 1982. – 236 s.
7. Korolyuk V.S. Stochastic Models of Systems / V.S. Korolyuk, V.V. Korolyuk. – Dordrecht: Springer Science+Business Media, 1999. – 185 p.
8. Grabski, F. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance / F. Grabski. – Gdynia, Poland, Elsevier Science, 2014. – 270 p.
9. Obzherin, Y.E. Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures / Y.E. Obzherin, E.G. Boyko. – London, Elsevier Academic Press, 2015, 212 r.
10. Obzherin, Y.E. Analysis of the reliability and efficiency of the technical system with preemptive recovery of a component / Y.E. Obzherin, E.G. Boyko, S.N. Fedorenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol.709, No.3, 2020, Art. No. 033029.
11. Obzherin, Y.E. Reliability of the information system with intermediate storage devices / Y.E. Obzherin, S.M. Sidorov, M.M. Nikitin // CCIS, vol.919, 2018. – P. 432–444.
12. Rabiner L.R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition / L.R. Rabiner // Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 2, 1989. – P. 257–286.
13. Ross S.M. Introduction to Probability Models, 9th ed. / S.M. Ross. – USA: Elsevier Academic Press, 2006, – 800 p.
14. Kobayashi H. Probability, Random Processes, and Statistical Analysis: Applications to Communications, Signal Processing, Queueing Theory and Mathematical Finance / H. Kobayashi, B. Mark, W. Turin. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011, – 812 p.

15. Capp'e O. Inference in Hidden Markov Models / O. Capp'e, E. Moulines, T. Ryden. – New York: Springer Sci.+Business Media, 2005, – 653 p.
16. Durand J.-B., Gaudoin O. Software reliability modelling and prediction with hidden Markov chains // Stat. Model. - An Int. J., Vol. 5(1), 2005. – P. 75–93.
17. Archer G.-E.B. Titterington D.M. Parameter estimation for hidden Markov chains / G.-E.B. Archer // Stat. Plann. Infer., Vol.108(1–2), 2002. – P.365–390.
18. Obzherin YU.E. Skrytaya markovskaya model' na osnove superpozicii dvuh processov vosstanovleniya / YU.E. Obzherin, S.M. Sidorov, M.M. Nikitin, S.G. Glech // Avtomatika i telemekhanika, № 6, 2021. – S. 80–101.
19. Obzherin Y.E. Hidden Markov model of information system with component-wise storage devices / Y.E. Obzherin, S.M. Sidorov, M.M. Nikitin // Lect. Notes Comput. Sci., Vol. 11965, 2019. –P.354–364.
20. Sidorov S.M. Skrytaya markovskaya model' dvuhkomponentnoj sistemy s gruppovym mgnovenno popolnyaemym rezervom vremeni / S.M. Sidorov // Informacionnye tekhnologii, T. 27, № 2, 2021. – S. 64–71.

¹Обжерин Юрий Евгеньевич, д.т.н., профессор, objsev@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Никитин Михаил Михайлович, преподаватель, m.nikitin.1979@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Сидоров Станислав Михайлович, к.т.н., доцент, хаевес@mail.ru, Россия, Севастополь, ООО «Плаг Энд Плей Инжиниринг»; Севастопольский государственный университет

⁴Федоренко Сергей Николаевич, старший преподаватель, sergey.fedor@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

HIDDEN MARKOV MODEL OF THE LATENT FAILURE CONTROL SYSTEM OF THE TECHNOLOGICAL CELL

Yu.E. Obzherin, M.M. Nikitin, S.M. Sidorov, S.N. Fedorenko

Semi-Markov and hidden Markov models are a widespread tool for modeling stochastic systems. The state codes of the semi-Markov model contain important information necessary to describe the functioning of the system, but it is not always possible to obtain it completely. In particular, it is possible to obtain some signal (information) associated with a semi-Markov process. In this case,

the states of the semi-Markov model are not observed (hidden). On practice, we are dealing with a certain vector of signals obtained as a result of the system operation. Consequently, there are problems of correcting the model, analyzing the dynamics of the modeled system and predicting its states on the basis of the received vector of signals. The problems described above can be solved using the apparatus of the theory of hidden Markov models. In this work, a hidden Markov model is built on the basis of a control system semi-Markov model for hidden failures of a technological cell. It is used to solve the problems of evaluating the characteristics of a semi-Markov model, analyzing its dynamics and predicting states based on the vector of signals obtained during the system operation. The constructed hidden Markov model makes it possible to expand the possibilities of semi-Markov model using, in the presence of variables in it that cannot be observed directly.

Key words: technological cell, semi-Markov control model, hidden Markov model, phase merging algorithm, latent failure, vector of signals, characteristics evaluation.

Obzherin Yuriy E., doctor of technical sciences, professor, objsev@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Nikitin Mikhail M., lecturer, m.nikitin.1979@gmail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Sidorov Stanislav M., candidate of technical sciences, docent, xaevec@mail.ru, Russia, Sevastopol, LLC "Plug and Play Engineering"; Sevastopol State University,

Fedorenko Sergey N., senior lecturer, sergey.fedor@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ С МГНОВЕННО ПОПОЛНЯЕМЫМ РЕЗЕРВОМ ВРЕМЕНИ С УЧЕТОМ ПРОФИЛАКТИКИ В СРЕДЕ ANYLOGIC

Заморёнов М.В.¹, Флоря П.Н.², Владимирова Е.С.³, Заморёнов И.М.⁴

Аннотация. В среде AnyLogic разрабатывается имитационная модель производственной системы, учитывающая влияние профилактики на производительность с учетом мгновенно пополняемого резерва времени. Проводится статистическая обработка результатов машинного эксперимента. Выносится суждение о правильности построения математической модели системы путем сравнения результатов аналитического и имитационного моделирования.

Ключевые слова. Имитационная модель, календарная профилактика, машинный эксперимент, AnyLogic.

При модернизации технических систем важным вопросом является оценка и повышение их производительности. Одним из сценариев повышения производительности систем является проведение различного рода профилактических работ. Оценка же производительности на этапе проектирования проводится при помощи моделирования [1]. Аналитическое моделирование [2 – 4] позволяет добиться высокой точности результатов за счет корректного применения математического аппарата, а также позволяет использовать иерархический подход к построению моделей систем, при котором сложная система разбивается на простейшие составляющие. Однако, не смотря на выше сказанное, правильность построения аналитических моделей, для исключения вероятных ошибок, проверяется сравнением результатов моделирования с машинным экспериментом (имитационным моделированием) [5 – 9].

В данной работе предлагается рассмотреть имитационную модель функционирования системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики.

Предлагается в среде AnyLogic построить имитационную модель такой системы и сравнить результаты моделирования с аналитической моделью [10].

Рассмотрим функционирование системы. Время ее безотказной работы – СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P(\alpha_1 \leq t)$, время восстановления системы – СВ β_1 с ФР $G_1(t) = P(\beta_1 \leq t)$. В случайные моменты времени (через промежутки времени α_2 с ФР $F_2(t) = P(\alpha_2 \leq t)$) проводится профилактика, время проведения профилактики – СВ β_2 с ФР

$G_2(t) = P(\beta_2 \leq t)$. Профилактика проводится, если момент начала профилактики попал на период работы системы. После проведения профилактики работа системы начинается сначала (рабочие свойства системы полностью обновляются). СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания и дисперсии; у ФР $F_1(t), F_2(t), G_1(t), G_2(t)$ существуют плотности $f_1(t), f_2(t), g_1(t), g_2(t)$.

Используемый резерв времени представляет собой СВ τ с ФР $R(t) = P(\tau \leq t)$. Отказ системы наступает, когда время восстановления после очередного нарушения ее работоспособности превысит резерв времени τ , или в момент начала выполнения профилактики. Профилактика проводится, если момент ее начала попал на период работы системы. После проведения восстановления или профилактики работоспособность системы полностью восстанавливается.

Для описания функционирования исходной системы введем следующее пространство полумарковских состояний [10, 11, 12, 13]:

$$E = \{S_{210}, S_{132x_1}, S_{230x_2x_3}, S_{221}, S_{102y_1y_2}, S_{200y_3}\},$$

где S_{221} – началась профилактика, работа системы прервана; S_{210} – восстановление или профилактика завершены, работа системы началась сначала; S_{132x_1} – система завершила работу, началось восстановление; используется резерв времени; время, оставшееся до проведения профилактики $x_1 > 0$; $S_{102y_1y_2}$ – резерв времени использован; время, оставшееся до восстановления $y_1 > 0$, до начала профилактики – $y_2 > 0$; $S_{230x_2x_3}$ – профилактика не проводится, т.к. момент профилактики попал на момент восстановления системы, используется резерв времени, время, оставшееся до восстановления $x_2 > 0$, до окончания резерва времени $x_3 > 0$; S_{200y_3} – профилактика не проводится, т.к. момент профилактики попал на момент восстановления системы; резерв времени использован; время, оставшееся до окончания восстановления $y_3 > 0$.

При построении модели примем ограничение: в связи с тем, что время восстановления системы во много раз меньше времени наработки на проведение профилактики, то за время восстановления системы событие – наработка на профилактику – может произойти не более 1 раза.

Граф исследуемой системы представлен на **Рис.1**.

Для данной системы множества работоспособных E_+ и E_- неработоспособных состояний имеют вид:

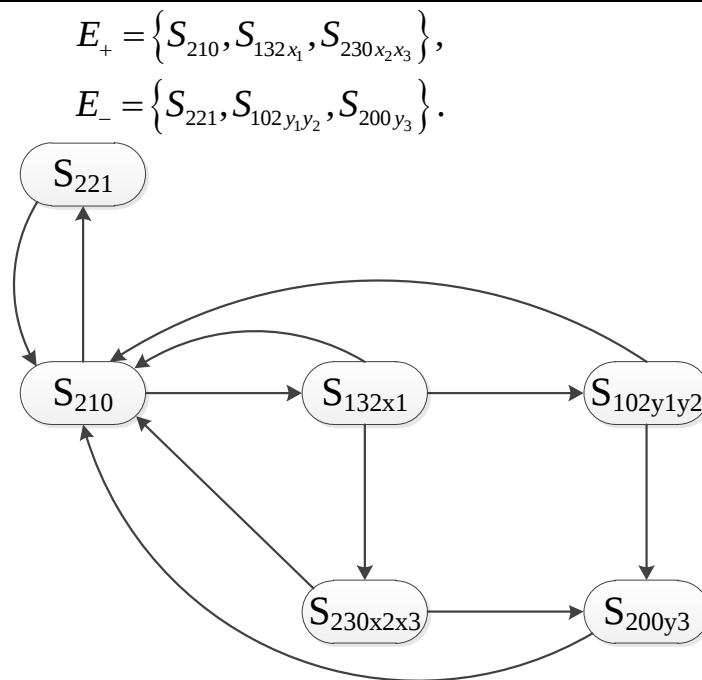


Рис.1 – Граф модели технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики

Построение имитационной модели однокомпонентной системы с учетом календарной профилактики проводилось в среде AnyLogic.

Система AnyLogic [11] предоставляет пользователю законченную высокоуровневую информационную технологию создания имитационных моделей. В этой системе имеются средства формализованного описания параллельных дискретных процессов в виде условных графических изображений или с помощью операторов собственного языка [12]. Координация процессов осуществляется автоматически в едином модельном времени. Пользователь в случае необходимости может ввести свои правила синхронизации событий. Имеются средства управления моделью, динамической отладки и автоматизации обработки результатов [13, 14, 15].

На **Рис.2** приведена часть модели, построенной в среде AnyLogic, имитирующая обслуживание заявок исследуемой системой.

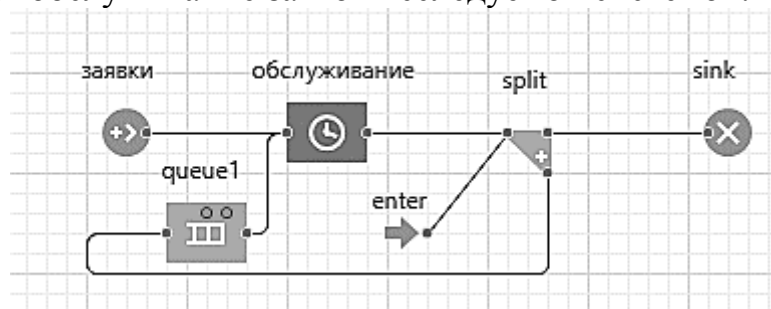


Рис.2 – Модель обслуживания в среде AnyLogic

🕒

резерв - Delay

Имя:

резерв

☒ Отображать имя
 ☐ Исключить

Тип задержки:

☒ Определенное время
☐ До вызова функции stopDelay()

Время задержки:

↺

exponential(0.8)+exponential(0.2666)

секунды ▼

Вместимость:

⇒

1

Максимальная вместимость:

⇒

Место агентов:

⇒

▼

🔗

► Специфические

▼ Действия

При входе:

≡

При подходе к выходу:

≡

При выходе:

≡

```

if (восстановление.size()>0)
{
    обслуживание.suspend();
    if (обслуживание.size()>0)
        enter.take(обслуживание.remove(обслуживание.get(0)));
}

```

При извлечении:

≡

Рис.4 – Блок «резерв»

При попадании агента «Аотказ» в блок «восстановление» производится следующие действия (Рис.5):

- приостанавливается обслуживание заявок;
- агент «Апрофилактика» удаляется из блока «наработка», при наличии
- агент «Апрофилактика» удаляется из блока «проведение», при наличии

При выходе агента «Аотказ» из блока «восстановление» возобновляется обслуживание заявок.

восстановление - Delay

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Тип задержки: ☒ Определенное время
☐ До вызова функции stopDelay()

Время задержки:

Вместимость:

Максимальная вместимость:

Место агентов:

Специфические Действия

При входе:

```
наработка.suspend();  
if (наработка.size()>0) enter2.take(наработка.remove(наработка.get(0)));  
if (проведение.size()>0) enter2.take(проведение.remove(проведение.get(0)));
```

При подходе к выходу:

При выходе:

```
if (обслуживание.isSuspended()) обслуживание.resume();  
if (наработка.isSuspended()) наработка.resume();  
if (резерв.size()>0) enter3.take(резерв.remove(резерв.get(0)));
```

При извлечении:

Рис.5 – Блок «восстановление»

На Рис.6 приведена часть модели, построенной в среде AnyLogic, имитирующая наработку и проведение профилактики исследуемой системы.

Для моделирования потоков наработки на и проведения профилактики создан Агент «Апрофилактика». Блок Source – «Профилактики», который создает одного агента «Апрофилактика», который в дальнейшем дублируется в блоке Split2 и отправляется в блок Sink1 и снова на обслуживание в блок Delay – «наработка». Перед блоком «наработка» стоит очередь, в которой агент «Апрофилактика» ожидает возможности занять этот блок. При попадании агента «Апрофилактика» в блок SelectOutput – «test» проводится проверка занятости блока «восстановление»: если он свободен, то агент «Апрофилактика» помещается в блок «проведение», в котором имитируется проведение профилактики; иначе – в блок Split2.

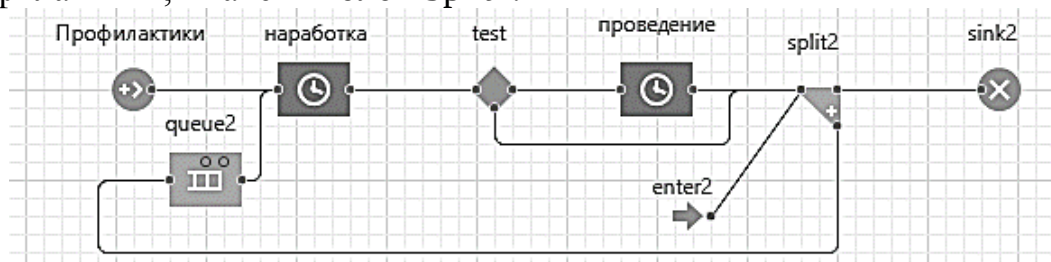


Рис.6 – Модель наработки и проведения профилактики в среде AnyLogic

При попадании агента «Апрофилактика» в блок «проведение» приостанавливается обслуживание заявок.

При попадании агента «Апрофилактика» в блок «проведение», если не проводится восстановление, производятся следующие действия (**Рис.7**):

- приостанавливается обслуживание заявок;
- агент «Аотказ» удаляется из блока «отказ», при наличии.

При выходе агента «Апрофилактика» из блока «проведение» производятся следующие действия (**Рис.6**):

- возобновляется обслуживание заявок;
- возобновляется работа блока «отказ».

🕒 проведение - Delay

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Тип задержки:

☒ Определенное время
☐ До вызова функции stopDelay()

Время задержки:

секунды ▼

Вместимость:

Максимальная вместимость:

Место агентов:

► Специфические

▼ Действия

При входе:

```

if (восстановление.size()==0)
{
    обслуживание.suspend();
    if (отказ.size()>0) enter1.take(отказ.remove(отказ.get(0)));
}

```

При подходе к выходу:

При выходе:

```

if (обслуживание.isSuspended()) обслуживание.resume();
if (отказ.isSuspended()) отказ.resume();

```

При извлечении:

```

if (отказ.isSuspended()) отказ.resume();

```

Рис.7 – Блок «проведение»

Приведем пример расчета коэффициента готовности исследуемой системы при следующих исходных данных: $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$, $R(t)$ распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка причем:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad f_2(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1},$$

$$g_1(t) = \frac{v_1 v_2 (e^{-v_1 t} - e^{-v_2 t})}{v_2 - v_1}, \quad g_2(t) = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2 - \gamma_1},$$

$$r(t) = \frac{\xi_1 \xi_2 (e^{-\xi_1 t} - e^{-\xi_2 t})}{\xi_2 - \xi_1}$$

где

$$\lambda_1 = 0.044 \text{ ч}^{-1}, \lambda_2 = 0.1333 \text{ ч}^{-1}; \mu_1 = 0.1333 \text{ ч}^{-1}, \mu_2 = 0.4 \text{ ч}^{-1};$$

$$v_1 = 0.1333 \text{ ч}^{-1}, v_2 = 0.4 \text{ ч}^{-1}; \gamma_1 = 8.0 \text{ ч}^{-1}, \gamma_2 = 2.6667 \text{ ч}^{-1};$$

$$\xi_1 = 0.8 \text{ ч}^{-1}, \xi_2 = 0.26667 \text{ ч}^{-1}$$

Результаты имитационного моделирования приведены на **Рис.8**

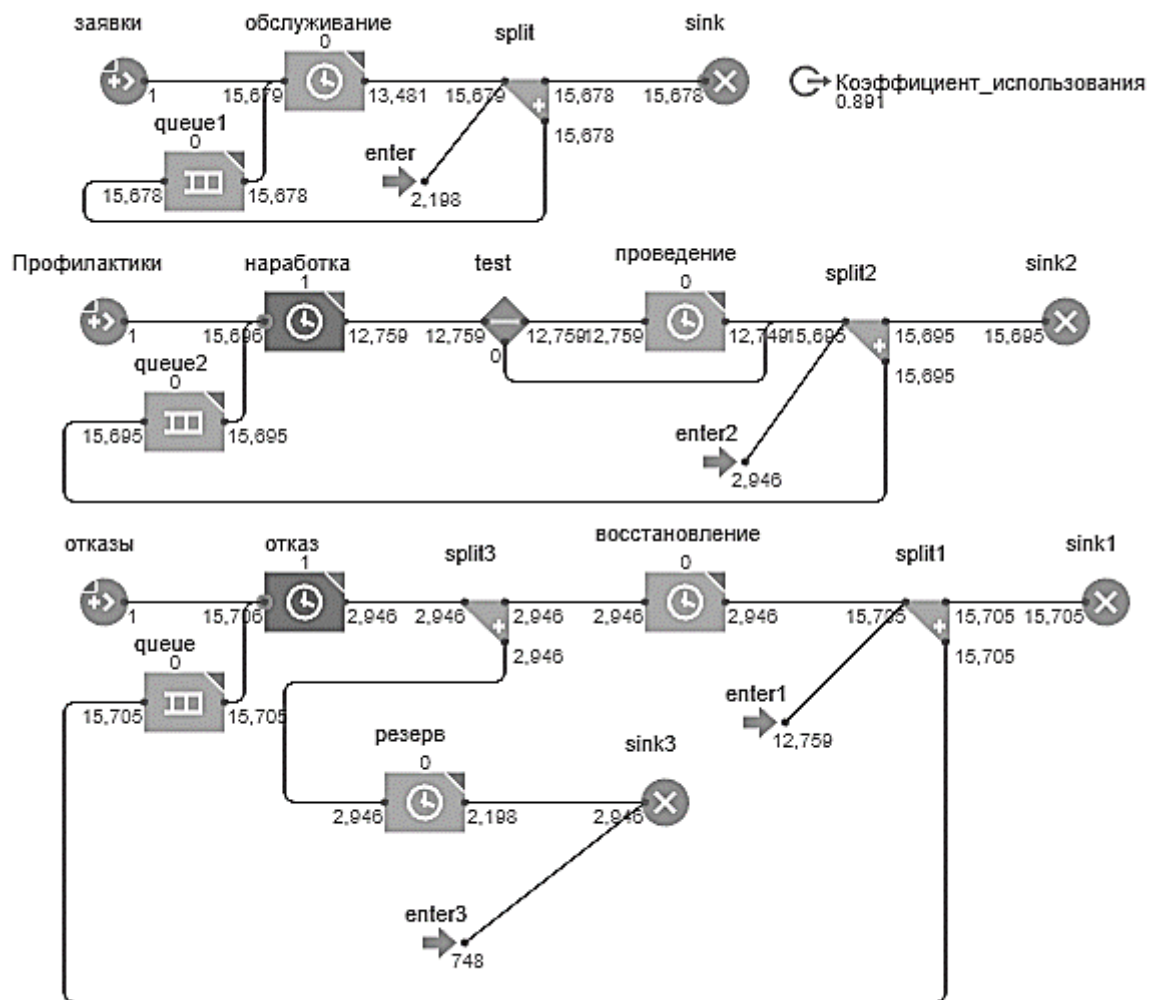


Рис.8 – Результаты моделирования системы в AnyLogic

Как видно из **Рис.8**, коэффициент готовности исследуемой системы составил 0,891, в то же время коэффициент готовности, полученный аналитически, равен 0,8653. Относительная погрешность результатов составляет 2,9%, что говорит о высокой точности построенных моделей.

В дальнейших исследованиях планируется проведение расчетов оптимального распределения времени проведения профилактики и времени между профилактиками, а также оптимизация временного резерва.

Библиографический список

1. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем. Монография / В.Я. Копп // Севастополь: СевНТУ, 2012 – 700с.
2. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1976. – 181 с.
3. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
4. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. – 284 с.
5. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В.Д. Боев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004 – 368 с.
6. Советов Б.Я. Моделирование систем: Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов по спец. АСУ / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1988. – 135 с.
7. Томашевский В.Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. — 416 с.
8. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS / Т.Дж. Шрайбер ; [пер. с англ. В.И. Гарчера, И.Л. Шмуйловича]; под ред. М.А. Файнберг. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
9. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Кудрявцев Е.М. – ДМК, Пресс 2004, 5-94074-219-X.
10. Боран-Кешишьян А.Л. Функционирование технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики / А.Л. Боран-Кешишьян, М.В. Заморёнов, П.Н. Флоря, А.А. Ярошенко, С.И. Кондратьев // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4 том 1, – С. 258-264
11. Боев В.Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов: Монография / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2011. – 404 с.

12. Дискретно-событийное моделирование. [Электронный ресурс] // AnyLogic. — URL: <http://www.anylogic.ru/discrete-event-simulation> (дата обращения: 27.03.2021).
13. Борщев, А.В. От системной динамики и традиционного ИМ — к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf> (дата обращения: 27.03.2021).
14. Кудрявцев, Е.М. Основы имитационного моделирования различных систем. / Е.М. Кудрявцев. — М.: ДМК пресс, 2004. — 320 с.
15. Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic. XJ Technologies: [электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.xjtek.ru>

Bibliograficheskiy spisok

1. Kopp V.YA. Modelirovanie avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem. Monografiya / V.YA. Kopp // Sevastopol': SevNTU, 2012 — 700s.
2. Korolyuk V.S. Polumarkovskie processy i ih prilozheniya / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. — K.: Nauk. Dumka, 1976. — 181 s.
3. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. — 138 p.
4. Kopp V.YA. Stokhasticheskie modeli avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s vremennym rezervirovaniem / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. — Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2000. — 284 s.
5. Boev V. D. Modelirovanie sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World / V.D. Boev. — SPb.: BHV-Peterburg, 2004 — 368 s.
6. Sovetov B.YA. Modelirovanie sistem: Kursovoe proektirovanie: Ucheb. posobie dlya vuzov po spec. ASU / B.YA. Sovetov, S.A. YAKovlev. — M.: Vyssh. shk., 1988. — 135 s.
7. Tomashevskij V.N. Imitacionnoe modelirovanie v srede GPSS / V.N. Tomashevskij, E.G. Zhdanova. — M.: Bestseller, 2003. — 416 s.
8. SHrajber T.Dzh. Modelirovanie na GPSS / T.Dzh. SHrajber ; [per. s angl. V.I. Garchera, I.L. SHmujlovicha]; pod red. M.A. Fajnberg. — M.: Mashinostroenie, 1980. — 592 s.
9. Kudryavcev E.M. GPSS World. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnyh sistem / Kudryavcev E.M. — DMK, Press 2004, 5-94074-219-H.
10. Boran-Keshish'yan A.L. Funkcionirovanie tekhnicheskoy sistemy s mgnovenno popolnyaemym rezervom vremeni s uchetom profilaktiki / A.L. Boran-Keshish'yan, M.V. Zamoryonov, P.N. Florya, A.A. YArashenko, S.I. Kondrat'ev // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 4 tom 1, — S. 258-264

11. Boev V.D. Issledovanie adekvatnosti GPSS World i AnyLogic pri modelirovanii diskretno-sobytiynyh processov: Monografiya / V.D. Boev. – SPb.: VAS, 2011. – 404 s.
12. Diskretno-sobytiynoe modelirovanie. [Elektronnyj resurs] // AnyLogic. — URL: <http://www.anylogic.ru/discrete-event-simulation> (data obrashcheniya: 27.03.2021).
13. Borshchev, A.V Ot sistemnoj dinamiki i tradicionnogo IM — k prakticheskim agentnym modelyam: prichiny, tekhnologiya, instrumenty. [Elektronnyj resurs]. — URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf> (data obrashcheniya: 27.03.2021).
14. Kudryavcev, E.M. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnyh sistem. / E.M. Kudryavcev. – M.: DMK press, 2004. – 320 s.
15. Mnogopodhodnoe imitacionnoe modelirovanie v AnyLogic. XJ Technologies: [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.xjtek.ru>

¹Заморёнов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент, Zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Флоря Павел Николаевич, gydra@bk.ru, директор ФГУП "13 судоремонтный завод Черноморского флота" Министерства Обороны Российской Федерации, Россия, Севастополь

³Владимирова Елена Сергеевна, старший преподаватель, lana_vladimir@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁴Заморёнов Илья Михайлович, студент, ilia.zamoryonov@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

ANALYSIS OF THE FUNCTIONING OF THE SYSTEM WITH AN INSTANTLY FILLED STANDBY TIME TAKING INTO ACCOUNT PREVENTION IN ANYLOGIC ENVIRONMENT

M.V. Zamoryonov, P.N. Florya, E.S. Vladimirova, I.M. Zamoryonov

In this article, a simulation model of a production system is developed in the AnyLogic environment, taking into account the impact of preventive maintenance on productivity, taking into account an instantly replenished reserve of time. Statistical processing of the results of a machine experiment is carried out. A judgment is made on the correctness of constructing a mathematical model of such a system by comparing the results of analytical and simulation modeling.

Keywords: simulation model, calendar prophylaxis, machine experiment, AnyLogic.

Zamoryonov Mikhail Vadimovich, candidate of technical science, docent, Zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

Florya Pavel Nikolaevich, gydra@bk.ru, Director of FSUE "13 Ship Repair Plant of the Black Sea Fleet" of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Russia, Sevastopol

Vladimirova Elena Sergeevna, Senior Lecturer, lena_vladimir@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Zamoryonov Ilya Mikhailovich, student, ilia.zamoryonov@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

О КЛАССИФИКАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КАНАЛОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

Доронина Ю.В.

Аннотация. Рассматриваются принципы классификации требований к системе мониторинга каналов информационного обмена в рамках взаимодействия беспилотных транспортных средств с диспетчерским центром на основе возможных оценок времени реализации требования относительно длительности цикла функционирования канала информационного обмена. Предложена гибридная схема системы поддержки принятия решений по оцениванию состояния каналов информационного обмена при мониторинге их работоспособности с учетом динамики требований к процессу мониторинга, особенностью которой является возможность реструктуризации, что позволит гибко реагировать на требования к этой системе.

Ключевые слова. Канал информационного обмена, беспилотные транспортные средства, система мониторинга, требование к системе, рабочий цикл.

Критичность областей применения каналов информационного обмена (КИО) обуславливает целесообразность уточнения подходов к анализу (мониторингу) процессов их функционирования. Например, для беспилотных транспортных средств (БТС), где КИО обеспечивают взаимодействие между БТС, окружением и диспетчерским центром (ДЦ), несвоевременная оценка снижения качества или явные помехи при функционировании КИО в БТС может повлечь катастрофические последствия. Для КИО, работающих в критичных областях, требуется постоянный или интенсивный мониторинг их состояния, что может быть реализовано в виде автоматизированной системы мониторинга (АСМ, далее СМ КИО). Например, для крупных производств, где в складских помещениях или распределенных корпусах организовано беспилотное транспортное передвижение, качество информационных обменов должно быть обеспечено на высоком уровне в связи с критичностью инфраструктуры и безопасности жизнеобеспечения сотрудников.

Особенностью такой системы является то, что КИО, обеспечивающие взаимодействие между БТС и ДЦ, работают циклично, с перерывами или интервалами значимых (различимых) взаимодействий. Такими циклами можно обозначить следующие интервалы работы КИО: простой цикл, передвижение не критичное (БТС без груза, пассажиров, по прямой, без возможных препятствий и т.п.), передвижение критичное (БТС с грузом,

пассажирами, по сложной трассе и т.п.). Заметим, что типизация видов циклов может быть сформулирована, исходя из требований каждой предметной области.

В работе [1] требование определяется как каждая отдельная работа из всего множества однотипных работ, заданных некоторой целесообразностью. Важную роль при анализе и реализации требований к системе играет их специфицирование, для создания систем программного уровня – Software Requirements Specification (SRS) [2]. В этом контексте SRS – это специальная документация для программного обеспечения (ПО), которая содержит в себе информацию о принципах функционирования программной системы, ее функциях, нагрузке, ограничениях и т.п.

Классические стандарты требований к системам с точки зрения инженерии требований, в большинстве случаев имеют дело с функциональными и нефункциональными требованиями, относящимися к основному функционалу системы и свойствам поддержки [3,4]. Фундаментальность этих принципов не всегда распространяется на особенности реализации систем с интенсивным совершенствованием и зачастую требуется ряд дополнений.

Модель описания требований уровня UML, как и SRS, отражает особенности создания ПО систем и в определенном смысле является частью понятия SRS, что не в полной мере дает инструментарий для построения требований к гибридным системам с интенсивным развитием и переменной структурой [5, 6].

Таким образом, при создании гибридных систем, характеризующихся необходимостью интенсивного развития, целесообразно рассматривать требования на двух уровнях: к созданию и развитию системы (уровень А), задачей которой является мониторинг критически значимого объекта (уровень Б), что отражает принцип «инженерии системы систем».

Цель работы – сформулировать принципы классификации требований к системе мониторинга КИО в рамках взаимодействия БТС с ДЦ на основе возможных оценок времени реализации требования относительно длительности цикла функционирования КИО и предложить гибридную схему системы поддержки принятия решений по оцениванию состояния каналов информационного обмена при мониторинге их работоспособности с учетом динамики требований к процессу мониторинга.

При взаимодействии БТС с ДЦ мониторинг состояния КИО представляет собой ответственный процесс оценивания качества информационных обменов, что влечет необходимость соответствующей настройки, реструктуризации или совершенствования системы мониторинга КИО. На **Рис.1** представлена укрупненная схема классов требований к СМ КИО.



Рис.1 – Укрупненная схема классов требований к СМ КИО

Приведенная на **Рис.1** схема требований содержит два основных класса: требования развития (совершенствования) СМ КИО и требования реструктуризации (модификации) СМ КИО, которые подразделяются, в свою очередь на плановые и неплановые, в зависимости от принадлежности к конкретному классу (на уровнях А или Б). Подобное деление с одной стороны, учитывает принятые стандартные классификации требований, с другой – при дальнейшей детализации учитывается многоуровневое и многозадачное функционирование рассматриваемых КИО, в том числе требования к подсистемам СМ КИО.

На **Рис.2** показан принцип формирования подобной «системы систем», когда одновременно рассматривается построение и развитие функционирующей СМ КИО с учетом иерархической структуризации самой СМ КИО (уровень А) и требования к самому объекту мониторинга – КИО (уровень Б).

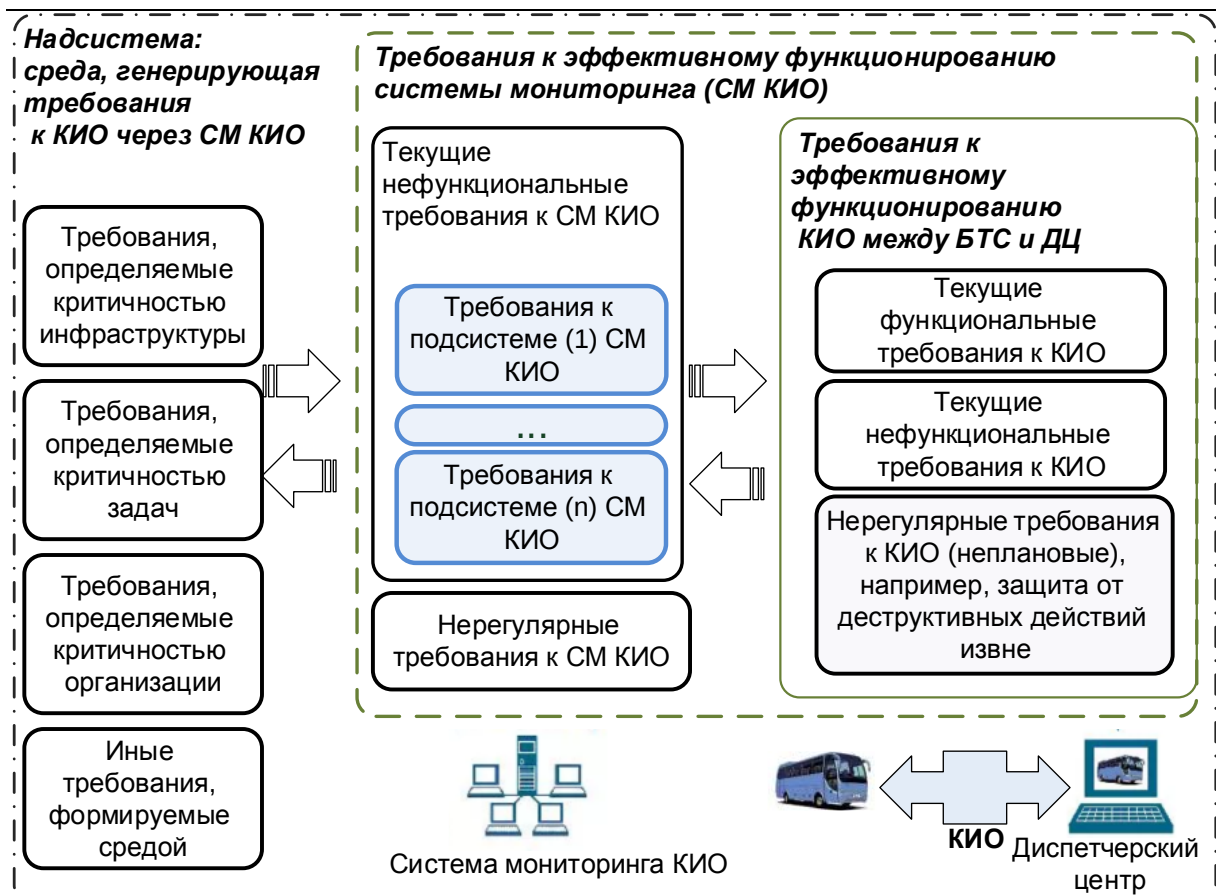


Рис.2 – Схема взаимодействия требований в гибридной системе СМ КИО ↔ КИО

На **Рис.3** представлена схема классификации требований к СМ КИО на основе карты спецификаций, которая представляет собой матричную структуру и охватывает основные уровни требований, классифицированные по определенным группам. Принадлежность требования к СМ КИО в рамках некоторой группы определяет его категорию (I – IV). Представленная спецификация требований содержит четыре уровня: проектный, программный, функциональный и организационный и четыре категории: I – характерные требования, II – малоресурсные, III – ресурсоёмкие, IV – аналитико-проектные.

По типам требования специфицируются следующим образом:

- характерные из списка возможных, внесённых в словарь требований к системе;
- нестандартное требование, реализуемое малыми ресурсами;
- нестандартное требование, порожденное снижением эффективности функционирования системы;

– нестандартное требование, порожденное значительным снижением эффективности системы, или требование, связанное с необходимостью расширения целей системы, **Рис.3.**

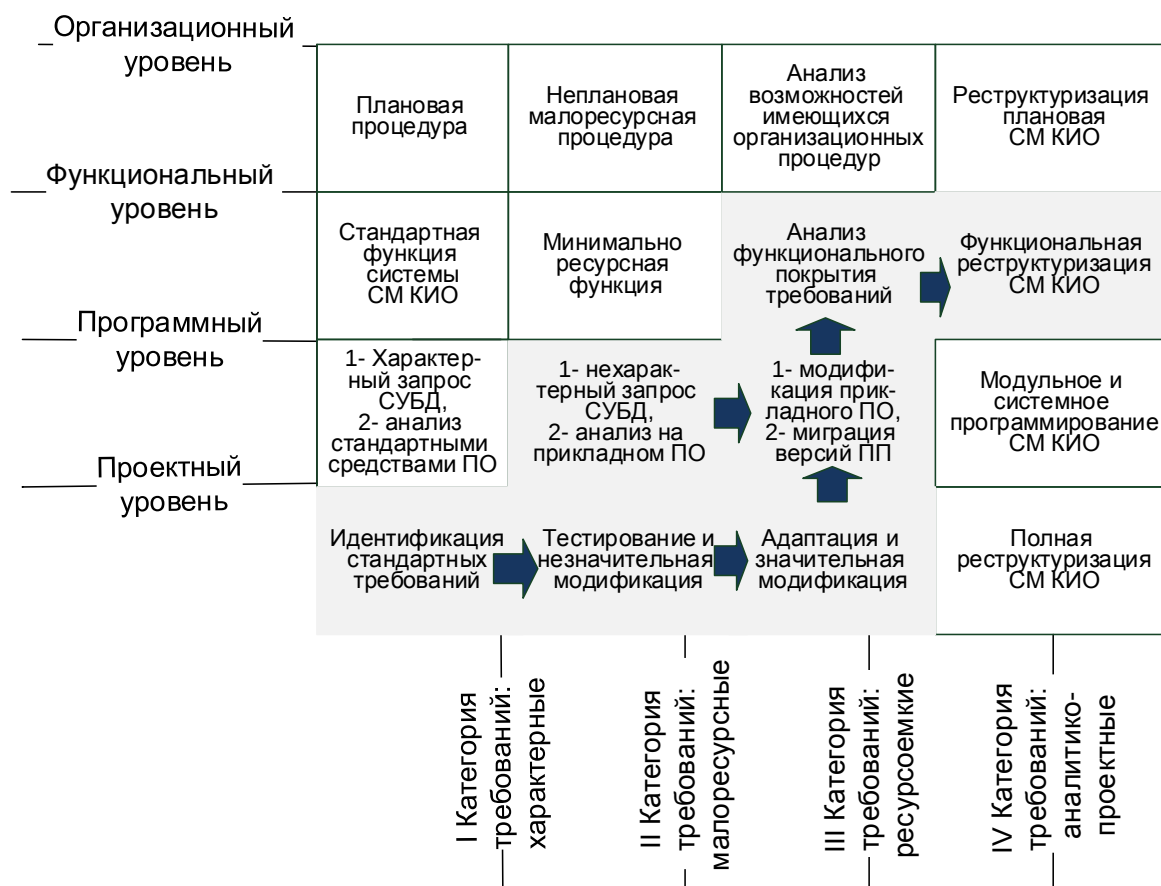


Рис.3 – Схема классификации требований к СМ КИО на основе карты спецификаций

При построении системы специфицирования требований предлагается соотнести время реализации требования в рамках СМ КИО по отношению к длительностям циклов функционирования КИО при перемещении, например, складского БТС [7-10]. Специалисты в области кибербезопасности обращают внимание на следующие проблемы функционирования производственных БТС [11-14]:

- ненадежность программного обеспечения, уязвимого в том числе к взлому и слежке;
- ненадежности сетей передачи данных;
- возможность остановки передачи данных, что без дальнейших деструктивных действий со стороны злоумышленника может привести к невозможности навигации и ориентации БТС;
- посредством развития атаки получение доступа к управлению БТС: выключения тормозов, изменение направления движения и т.д.;

- несанкционированный доступ к основным узлам на программном уровне и, как следствие, нарушение технологических циклов работы;
- блокирование управления из-за деструктивного воздействия программных вирусов;
- человеческий фактор (свободный доступ к элементам БТС), ошибки программистов и проектировщиков, социальная инженерия) и другие.

Таким образом, целесообразно учитывать множество факторов, влияющих на ожидаемый эффект от применения БТС.

Примем следующие обозначения: T_c – среднее время цикла работы КИО, $0 \leq T_c \leq T_{\max}$; T_c^0 – среднее время цикла работы КИО при некритическом передвижении, $0 \leq T_c^0 \leq T_{\max}$; T_c^1 – среднее время цикла работы КИО при критическом передвижении, $0 \leq T_c^1 \leq T_{\max}^1$; t_i, τ_j – ожидаемое текущее время цикла работы КИО и время работы СМ КИО соответственно, $0 \leq t_i \leq T_c$, $0 \leq \tau_j < T_c$, $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$. Требование к СМ КИО: $\theta_k \in \{\Theta\}, k = \overline{1, K}$ из множества Θ может относиться к одному из классов: $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_m$, определенных ЛПР. С учетом более сложной структуры классификационных признаков, **Рис.1, Рис.3**, множество Θ может иметь сложную иерархию.

Ожидание эффекта E при работе КИО в текущем цикле передвижения t_i БТС реализуется за счет того, что ожидаемый период времени мониторинга СМ КИО τ_j много меньше текущего цикла: $\tau_j \ll T_c$, что обеспечивает, особенно в случае критического цикла передвижения T_c^1 , возможность нивелировать ошибки работы, выявленные в процессе мониторинга КИО.

Таким образом, если g – мажоранта множества $T_c^{\tau_j}$, что $\forall \tau_c^1 \in T_c \Rightarrow \tau_c^1 \leq g$, причем существует такое текущее значение τ_c^2 , для которого $\exists \tau_c^2 \in T_c \Rightarrow \tau_c^2 \ll h$, $h = \sup(T_c^2)$ и $S_{\tau_c^2} = \{T_c^2 \in T_c \mid \forall \tau_c^2 \in T_c : \tau_c^2 \ll h\}$ Ожидаемый $E_{i,j,v}^{(k)}$ определяется нагрузкой КИО $Y_i^{(k)}$, требованиями класса Θ_v^{type} и некоторой случайной функцией $\xi(t_i, \tau_j)$, отражающей влияние внешних негативных факторов:

$$E_{i,j,v}^{(k)} = W(Y_i^{(k)}, \Theta_v^{type}, \xi(t_i, \tau_j), h, g), \quad (1)$$

где $\Theta_v^{type} \in \Theta \mid type = \{\Theta_1^k, \dots, \Theta_v^k\}, v = \overline{1, V}$.

Ставится задача максимизации функционала $W(.)$ определенного в (1) при ограничениях на времена мониторинга τ_j при $h = \sup(T_c^2)$ и

$\tau_j \ll T_c, 0 \leq t_i \leq T_c$. Для решения этой задачи были доказаны ряд теорем, определяющих условия существования h, g в классах Θ_v^{type} при такой $\xi(t_i, \tau_j)$, что ожидаемое $E_{i,j,v}^{(k)} \leq e^{kp}$. В рамках данной статьи они не приводятся.

На **Рис.4** приведена гибридная схема системы поддержки принятия решений (СППР) по оцениванию состояния КИО, обеспечивающих взаимодействие производственных складских БТС с ДЦ при мониторинге их работоспособности с учетом динамики требований к процессу мониторинга. Общая схема работы гибридной СППР следующая: на основе идентификации задачи управления БТС посредством передачи соответствующих указаний от ДЦ по КИО формируются принадлежности требования к СМ классу из множества, далее реализуется уточнение самой задачи управления, а также требований ЛПР к СМ КИО. Таким образом, наряду с работой КИО, формируются управления для системы мониторинга КИО и возможной реструктуризации в рамках полученного класса требований Θ_v^{type} . Сопоставление классов требований к СА КИО и задач самой БТС запоминается и может быть в дальнейшем использовано для подготовки КИО к критическим задачам обмена (в рамках соответствующих T_c^1). Предусмотренные блоки ввода параметров позволяют гибко реагировать на требования как к КИО, так и, соответственно к СМ КИО, определяя, в том числе, например, требуемую пропускную способность КИО или заданную нагрузку $Y_i^{(k)}$.

Новизна предложенной СППР состоит в возможности реструктуризации, что позволит гибко реагировать на требования к СМ КИО, например, из класса Θ_s , связанные с обеспечением заданной пропускной способности КИО при возможных помехах деструктивном воздействии.



Таким образом, сформулированные принципы классификации требований к системе мониторинга КИО в рамках взаимодействия БТС с ДЦ на основе возможных оценок времени реализации требования относительно длительности цикла функционирования КИО позволит гибко реагировать на требования к СМ КИО, например, из класса Θ_s , связанные с обеспечением заданной пропускной способности КИО при возможных помехах деструктивном воздействии. Предложенный каркас гибридной СППР по оцениванию состояния каналов информационного обмена при мониторинге их работоспособности с учетом динамики требований к процессу мониторинга имеет модульную архитектуру и может быть расширен, исходя из конкретных задач складского учета и технически возможностей БТС и КИО.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 19-29-06015/19, 19-29-06023/19).

Библиографический список

1. Дагабян А.В. Проектирование технических систем / А.В. Дагабян. — М.: Машиностроение, 1986. — 256 с.

2. Femmer H. Rapid quality assurance with Requirements Smells / H. Femmer, D.F. Méndez, S. Wagner, S. Eder // *Journal of Systems and Software* 123: 190–213. arXiv:1611.08847. doi:10.1016/j.jss.2016.02.047. S2CID 9602750.
3. Коберн А. Современные методы описания функциональных требований к системам / А. Коберн. – М.: издательство "Лори", 2002. – 263 с
4. Булуй Ю. Введение в программную инженерию и управление жизненным циклом ПО Программная инженерия. Программные требования Copyright / Ю. Булуй, С. Орлик. – 2004-2005
5. Буч Г. UML. Классика CS / Г. Буч, А. Якобсон, Дж. Рамбо – СПб.: Питер, 2006. – 736 с.
6. Panella I. Model Oriented System Design Applied to Commercial Aircraft Secondary Flight Control Systems / I. Panella, G. Hardwick // *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SIMULTECH 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019, vol. 873 – pp. 55–76.
7. Shadrin S.S. Using Data From Multiplex Networks on Vehicles in Road Tests, in *Intelligent Transportation Systems, and in Self-Driving Cars* / S.S. Shadrin, A.M. Ivanov, K.E. Karpukhin // *Engineering Research*. doi:10.3103/S1068798X16100166.
8. Беляев К.М. Кибернетическая безопасность беспилотного транспорта / К.М. Беляев, А.А. Романов // *ТТПС*. 2018. №2 (44). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kiberneticheskaya-bezopasnost-bespilotnogo-transporta> (дата обращения: 28.11.2021).
9. Гамаюнов А.Р. Удалённая коммуникация множества пользователей с мультиагентной распределённой системой на основе мобильных автономных бтс / А.Р. Гамаюнов, Е.М. Притоцкий, П.К. Герасимов, Д.А. Егоров // Четвертый Всероссийский научно-практический семинар Ч-52 «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2017, 5-6 октября 2017 г., г. Казань, Республика Татарстан, Россия): тр. семинара, 2017. – С. 226-235.
10. Ройзензон Г.В. Построение многомерного классификатора интеллектуальных роботов / Г.В. Ройзензон, В.Э. Карпов, В.Е. Павловский // Четвертый Всероссийский научно-практический семинар Ч-52 «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2017, 5-6 октября 2017 г., г. Казань, Республика Татарстан, Россия): тр. семинара, 2017. – С. 175-182.
11. Кульба В. В. Сценарное исследование сложных систем: анализ методов группового управления / В.В. Кульба, Д.А. Кононов, И.В. Чернов, П.Е. Рошин, О.А. Шулигина // *УБС*. 2010. №30-1. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/stsenarnoe-issledovanie-slozhnyh-sistem-analiz-metodov-grupпового-upravleniya> (дата обращения: 27.11.2021).

12. Okhtilev M. Yu. Methods and Algorithms of Integrated Modeling of Complex Technical Objects in Dynamically Changing Conditions / M.Yu. Okhtilev, A.S. Gnidenko, V.V. Alferov, V.I. Salukhov, D.I. Nazarov // Proceedings of the International Scientific Conference ММЕТ NW. 2018. – pp. 282–284.
13. Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)» (9 октября 2015г., г. Санкт-Петербург, Россия): Труды семинара. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015 – 140 с.
14. Ройзензон Г.В. Синергетический эффект в принятии решений / Г.В. Ройзензон // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, № 36. 2011-2012. С.248–272.

Bibliograficheskiy spisok

1. Dagabyan A.V. Proektirovanie tekhnicheskikh sistem / A.V. Dabagyan. — М. : Mashinostroenie, 1986. – 256 s.
2. Femmer H. Rapid quality assurance with Requirements Smells / H. Femmer, D.F. Méndez, S. Wagner, S. Eder // Journal of Systems and Software 123: 190–213. arXiv:1611.08847. doi:10.1016/j.jss.2016.02.047. S2CID 9602750.
3. Kobern A. Sovremennye metody opisaniya funkcional'nyh trebovanij k sistemam / A. Kobern. – М.: izdatel'stvo "Lori", 2002. – 263 s
4. Buluj YU. Vvedenie v programmnyu inzheneriyu i upravlenie zhiznennym ciklom PO Programmaya inzheneriya. Programmnye trebovaniya Copyright / YU. Buluj, S. Orlik. – 2004-2005
5. Buch G. UML. Klassika CS / G. Buch, A. YAkobson, Dzh. Rambo – SPb.: Piter, 2006. – 736 s.
6. Panella I. Model Oriented System Design Applied to Commercial Aircraft Secondary Flight Control Systems / I. Panella, G. Hardwick // Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SIMULTECH 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. 2019, vol. 873 – pp. 55–76.
7. Shadrin S.S. Using Data From Multiplex Networks on Vehicles in Road Tests, in Intelligent Transportation Systems, and in Self-Driving Cars / S.S. Shadrin, A.M. Ivanov, K.E. Karpukhin // Engineering Research. doi:10.3103/S1068798X16100166.
8. Belyaev K.M. Kiberneticheskaya bezopasnost' bespilotnogo transporta / K.M. Belyaev, A.A. Romanov // TTPS. 2018. №2 (44). URL:

-
- <https://cyberleninka.ru/article/n/kiberneticheskaya-bezopasnost-bespilotnogo-transporta> (data obrashcheniya: 28.11.2021).
9. Gamayunov A.R. Udalyonnaya kommunikaciya mnozhestva pol'zovatelej s mul'tiagentnoj raspredelyonnoj sistemoj na osnove mobil'nyh avtonomnyh bts / A.R. Gamayunov, E.M. Pritockij, P.K. Gerasimov, D.A. Egorov // CHetvertyj Vserossijskij nauchno-prakticheskij seminar CH-52 «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta» (BTS-II-2017, 5-6 oktyabrya 2017 g., g. Kazan', Respublika Tatarstan, Rossiya): tr. seminar, 2017. – S. 226-235.
 10. Rojzenzon G.V. Postroenie mnogomernogo klassifikatora intellektual'nyh robotov / G.V. Rojzenzon, V.E. Karpov, V.E. Pavlovskij // CHetvertyj Vserossijskij nauchno-prakticheskij seminar CH-52 «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta» (BTS-II-2017, 5-6 oktyabrya 2017 g., g. Kazan', Respublika Tatarstan, Rossiya): tr. seminar, 2017. – S. 175-182.
 11. Kul'ba V. V. Scenarnoe issledovanie slozhnyh sistem: analiz metodov gruppovogo upravleniya / V.V. Kul'ba, D.A. Kononov, I.V. Chernov, P.E. Roshchin, O.A. Shuligina // UBS. 2010. №30-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stsenarnoe-issledovanie-slozhnyh-sistem-analiz-metodov-gruppovogo-upravleniya> (data obrashcheniya: 27.11.2021).
 12. Okhtilev M. Yu. Methods and Algorithms of Integrated Modeling of Complex Technical Objects in Dynamically Changing Conditions / M.Yu. Okhtilev, A.S. Gnidenko, V.V. Alferov, V.I. Salukhov, D.I. Nazarov // Proceedings of the International Scientific Conference MMET NW. 2018. – pp. 282–284.
 13. Vtoroj Vserossijskij nauchno-prakticheskij seminar «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta (BTS-II-2015)» (9 oktyabrya 2015g., g. Sankt-Peterburg, Rossiya): Trudy seminar. – Sankt-Peterburg: Izd-vo «Politekhnika-servis», 2015 – 140 s.
 14. Rojzenzon G.V. Sinergeticheskij effekt v prinyatii reshenij / G.V. Rojzenzon // Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problemy. Ezhegodnik, № 36. 2011-2012. S.248–272.

*Доронина Юлия Валентиновна, д.т.н., профессор,
YVDoronina@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

*ON THE CLASSIFICATION OF REQUIREMENTS WHEN CREATING A
MONITORING SYSTEM FOR INFORMATION EXCHANGE CHANNELS*

Yu.V. Doronina

The principles of classification of requirements for the monitoring system of information exchange channels within the framework of the interaction of unmanned vehicles with the dispatch center are considered on the basis of possible estimates of the time of implementation of the requirement regarding the duration of the cycle of the information exchange channel. A hybrid scheme of a decision support system for assessing the state of information exchange channels while monitoring their operability is proposed, taking into account the dynamics of the requirements for the monitoring process, the feature of which is the possibility of restructuring, which will allow flexible response to the requirements for this system.

Keyword: information exchange channel, unmanned vehicles, monitoring system, system requirement, operating cycle.

Doronina Yulia Valentinovna, doctor of technical sciences, professor, YVDoronina@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

ТОЧЕЧНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Осипов К.Н.¹, Новиков В.В.², Маврин С.А.³

***Аннотация.** Предлагается подход к построению эмпирических прогнозирующих моделей подшипников качения, применяемых в общем машиностроении по результатам измерения их вибрационных характеристик. Данный подход базируется на использовании современных методов стохастического моделирования нестационарных процессов по результатам наблюдений за объектом. Приводится численный пример.*

***Ключевые слова.** Моделирование, диагностика, анализ временных рядов.*

Результатом анализа и прогнозирования технических состояний сложных технических объектов и систем, в том числе их отдельных элементов, например, подшипниковых узлов является решение относительно наличия у объектов требуемых свойств, обеспечивающих их пригодность к дальнейшему применению и позволяющих оценить правильность выполнения заданных функций. При этом достижение технического результата предполагает наличие одной или нескольких моделей объектов, которые зависят от свойств объектов, целевого содержания оценки, прогнозирования и условий оценивания [1,2,3].

Обзор современной литературы показал, что существующий опыт, накопленный отечественными исследователями в области технической диагностики и технического контроля, свидетельствует о том, что в ходе эксплуатации при оценке технических состояний наряду с полными, высокоточными, многофункциональными математическими моделями, как правило, описываемыми системами нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, целесообразно использовать специализированные и упрощенные модели, предъявляющие меньшие требования к вычислительным ресурсам и обеспечивающие высокое быстродействие [4-8]; это позволяет получить необходимые результаты в условиях ограничений на сроки испытаний, а также материальные, энергетические и трудовые ресурсы. Кроме этого, в некоторых случаях, при наличии большого объема эмпирических данных решение задачи оценки (классификации) технических состояний и прогнозирования общей динамики процесса может быть достигнуто применением методологии машинного обучения, например, путем построения многослойных

искусственных нейронных сетей прямого или обратного распространения. Так, например, Специалистами компании «Ford Motors Company» еще в 1989 году была построена искусственная нейронная сеть, позволяющая по результатам измерения 31-го параметра выявлять техническое состояние двигателей внутреннего сгорания с вероятностью, превышающей 90 % [8]. Единственным недостатком применения искусственных нейронных сетей в настоящее время является сложность интерпретации получаемого в результате их работы результата. Другими словами, результат применения нейронных сетей для диагностики сложных технических объектов и систем, в некоторых случаях, принимает некоторый эвристический характер. Однако накопленный опыт в решении подобных эмпирических задач может быть использован как фундамент для дальнейшего совершенствования методов и алгоритмов оценки и прогнозирования технических состояний сложных технических объектов и систем.

Целью данной работы является разработка подхода к построению эмпирических прогнозирующих моделей по результатам измерения диагностических параметров для упреждения внезапного перехода изделий в опасное техническое состояние.

В терминах технической диагностики техническое состояние изделий принято оценивать по результатам измерения диагностических параметров, функционально зависящих от параметров, непосредственно характеризующих качество изготовления и сборки изделия. При это, как это было показано в предыдущих исследованиях, например, в работах [1,7] в ходе эксплуатации процессы изменения диагностических параметров могут быть описаны упрощенными моделями в виде линейных дифференциальных уравнений второго порядка с коэффициентами, зависящими от времени:

$$\ddot{y}(t) + G(t) \cdot \dot{y}(t) + P(t) \cdot y(t) = F(t), \quad (1)$$

где G, P – матрицы, описывающие диссипативные параметры демпфирования, а также жесткости, $F(t)$ – вектор внешних возмущений в системе с изменяющимися компонентами.

Предполагая, что значения матриц G, P зависят не только от времени, но и от вектора неизвестных параметров, определяющих техническое состояние изделия $x(t)$, выражение (1) в первом приближении можно в следующем виде дифференциального уравнения:

$$\ddot{y}(t) + G(x, t) \cdot \dot{y}(t) + P(x, t) \cdot y(t) = F(t). \quad (2)$$

Предлагается решение уравнения (2) как некоторый вектор:

$$y(t) = W(x, t) \cdot F(x, t). \quad (3)$$

Очевидно, что для продолжительного промежутка времени, в течение которого реализуется мониторинг технического состояния, считать вектор $x(t)$ постоянным было бы неверно. Поэтому для нахождения точного

аналитического описания уравнения (3) необходимо составление дифференциального уравнения, описывающего процесс изменения вектора $x(t)$. Однако данный подход является полностью детерминированным. В действительности процесс изменения вектора $x(t)$ представляет комбинацию двух процессов: детерминированного и стохастического, обусловленного влиянием большого количества внешних факторов. Поэтому, принимая во внимание то, что процесс изменения технического состояния изделия представляет смесь детерминированного сигнала со случайными возмущениями, представим вектор $x(t)$, характеризующий изменение технического состояния, в виде суммы двух компонент:

$$x(t) = x_0(t) + \tilde{x}(t), \quad (4)$$

где $x_0(t)$ – детерминированная составляющая сигнала, а $\tilde{x}(t)$ – случайная составляющая сигнала.

Вектор $y(t)$, характеризующий изменение измеренных значений сигнала может быть представлен аналогично уравнению (4).

Разобьем исследуемый временной интервал на отдельные непересекающиеся подмножества:

$$[0; T] = \bigcup_{i=0}^n [T_{i-1}; T_i],$$

Тогда, используя методологию, описанную в работах [5,6], вектор состояния системы в дискретные моменты времени i представлена в виде Марковского процесса:

$$x_i = A_i(x_{i-1}, (y_m)_{i-1}) \cdot x_{i-1}, \quad (5)$$

где y_{mi} – вектор амплитуд спектральных характеристик сигнала на интервале $[T_{i-1}; T_i]$, $A_i(x_{i-1}, y_{mi})$ – матричный, в том числе нелинейный оператор, определяющий процесс изменения вектора x .

Выбор Марковского процесса в уравнении (5) возможен, т.к. изменение параметров в механических системах в основном зависит от предшествующего состояния и практически не зависит от всего хода процесса $x(t)$, что было доказано Голиковой В.В. в работах [3,5].

Значения $(y_m)_i$ могут быть определены из выражения:

$$(y_m)_i = B_i(x_{i-1}) \cdot x_i, \quad (6)$$

где B – матрица, зависящая от элементов матриц передаточной функции и координат вектора возмущений.

В ходе мониторинга технического состояния изделий машиностроения, например, подшипников качения уравнения (6) и (5) используется для оценки и прогнозирования вектора параметров технического состояния $x(t)$ по известным из наблюдений значениям вектора $(y_m)_i$ с учетом параметров зашумления. Сложность технической

реализации данной процедуры, при известных количественных оценках матриц системы $A(t)$ и $B(t)$ заключается в том, что на практике истинные значения вероятностных характеристик наведенных шумов и случайных составляющих процесса $x(t)$ неизвестны, доступны только их выборочные оценки, использование которых вместо истинных значений может привести к ошибкам в результатах. Поэтому для решения данной задачи предлагается использовать адаптивный алгоритм, работающий в условиях минимальной априорной информации. В качестве такого алгоритма может быть использован известный алгоритм фильтра Калмана, который содержит следующие уравнения.

Априорная оценка $\hat{x}_{t/t-1}$ вектора состояния (т.е. оценка в момент времени t по результатам наблюдений до момента $t-1$ включительно) определяется выражением

$$\hat{x}_{t/t-1} = A_t(x_{t-1}, (y_m)_{t-1}) \cdot \hat{x}_{t-1}, \quad (7)$$

при поступлении нового измерения корректируется

$$\hat{x}_t = \hat{x}_{t/t-1} + K_t z_t, \quad (8)$$

в зависимости от разницы между ним и априорной оценкой:

$$z_t = (y_m)_t - B(\hat{x}_{t-1}) \cdot \hat{x}_{t/t-1}. \quad (9)$$

Эту разницу называют также невязкой (инновацией, остаточным членом). Матрица K_t – матрица оптимальных весовых коэффициентов (коэффициентов усиления).

В качестве примера применения предлагаемого алгоритма для оценки параметров вектора состояния рассмотрим процесс оценки вектора состояния линейной динамической системы в случае, когда уравнения состояния имеют вид стационарного процесса авторегрессии первого порядка:

$$x_t = ax_{t-1} + b \cdot v_t. \quad (10)$$

Уравнение наблюдений примем в виде:

$$y_t = x_t + \omega_t. \quad (11)$$

Будем считать, что математическое ожидание процесса (10) равно нулю, а шум-сигнальная составляющая v_t представляет Гауссовский процесс с единичной дисперсией. Далее будем считать, что возмущения в канале измерений и в канале вектора состояния не коррелированы между собой, т.е. $E[v_t, \omega_t] = 0$, $E[x_t, \omega_t] = 0$, $E[v_t, y_t] = 0$.

Найдем оптимальные оценки вектора состояния, используя оптимальный дискретный фильтр Калмана [1,4]. Для этого, с целью реализации вычислительного эксперимента, зададим следующие численные значения параметров системы (10), (11):

$$a = e^{-1},$$

$$b = \sqrt{15(1 - e^{-2})},$$

$$\sigma_x^2 = \text{var}(x_t) = \frac{b^2}{1 - a^2} = 15, \quad (12)$$

$$\sigma_y^2 = T = \text{var}(y_t) = 16.$$

Результат реализации алгоритма (7), (9) представлен на **Рис.1**

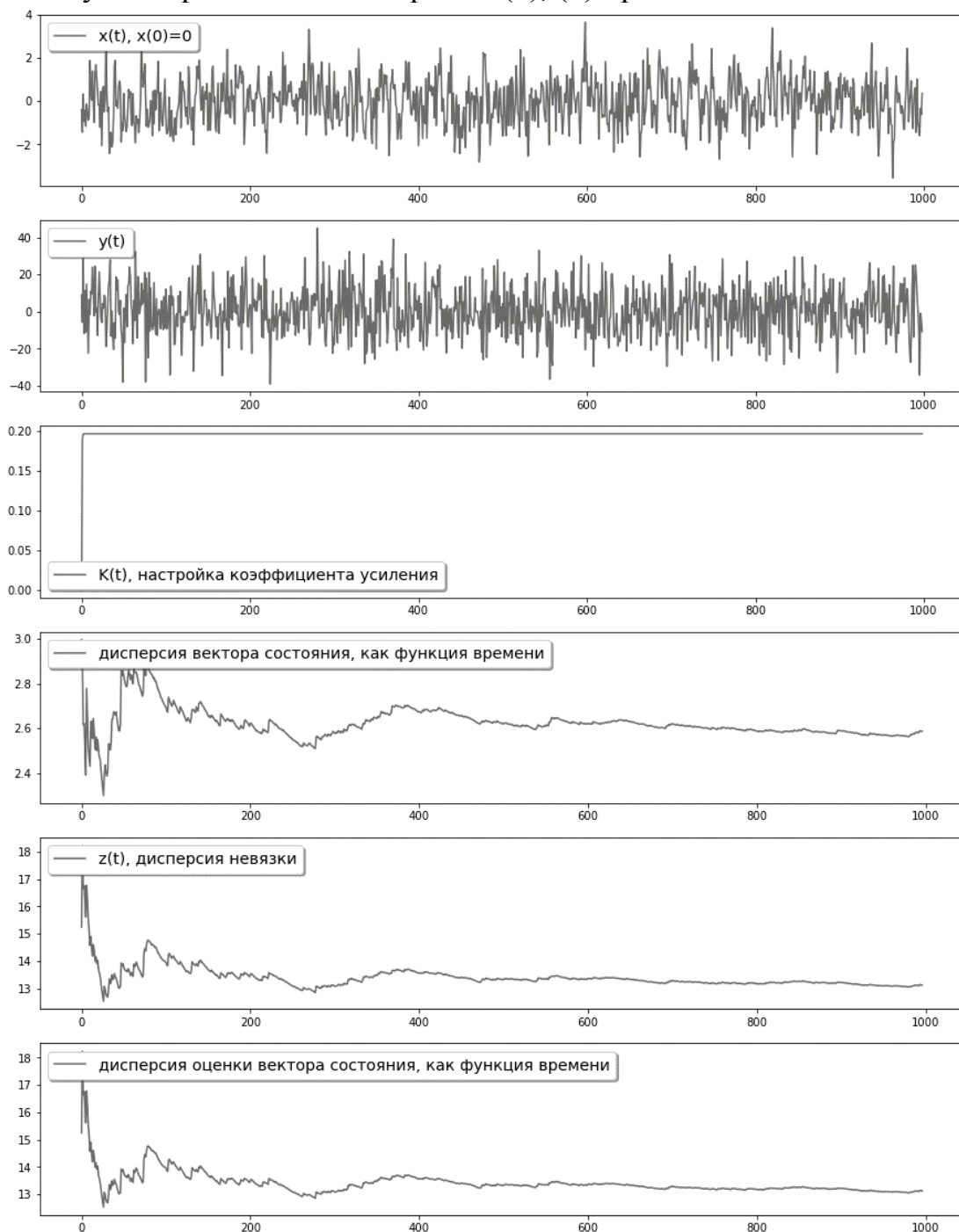


Рис.1 – Исследование характеристик оптимального фильтра Калмана

Из анализа **Рис.1** следует, что при известных значениях оценок параметров шум-сигнальной составляющей оценки, полученные фильтром Калмана очень быстро сходятся с истинными значениями и являются несмещенными. Так, например, уже на 100-м измерении ошибки оценки дисперсии вектора состояния принимают установившееся значения и не превышают 7 % (**Рис.2**). Кроме этого ошибки оценивания или инновации имеют нормальное распределение, что также позволяет не отвергнуть гипотезу о состоятельности оценок.

К основным преимуществам предлагаемого алгоритма оценки технических состояний можно отнести то, что он может быть применен не только для решения задач оценивания, но и для решения задач точечного прогнозирования значений вектора состояния. Пример применения фильтра Калмана для расчета точечных прогнозных значений дисперсии вектора состояния по результатам измерения вектора $y(t)$ представлен на **Рис.3**.

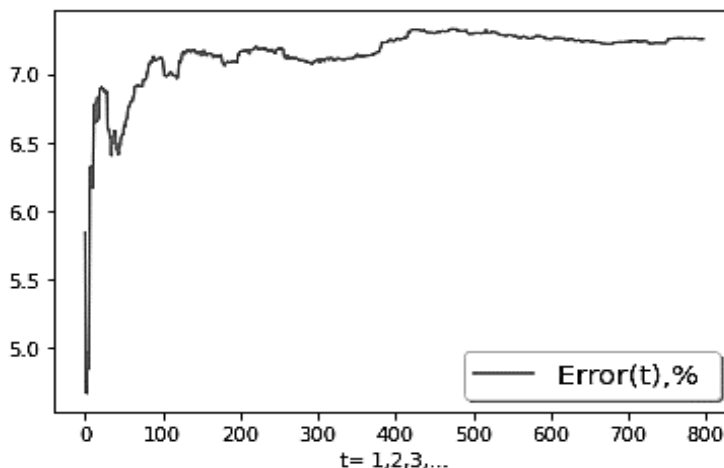


Рис.2 – Изменение ошибок оценки дисперсии вектора состояния фильтром Калмана

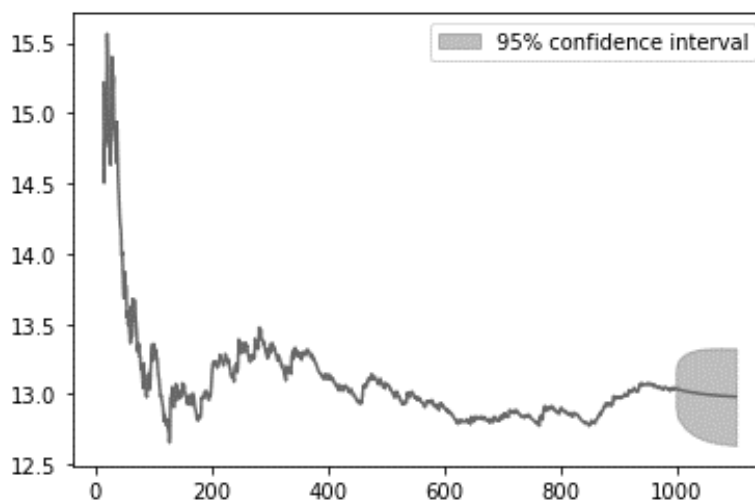


Рис.3 – Пример прогнозирования дисперсии вектора состояния

Необходимо отметить, что в некоторых работах, например, в [7] указывается на то, что в ряде случаев, когда отсутствует возможность определения точных значений параметров шума, оценки, полученные фильтром Калмана, могут существенно отличаться от действительных. В этой связи дальнейшими направлениями исследований могут являться задачи устранения указанного недостатка, особенно для случаев, когда закон распределения шумов отличается от нормального.

В условиях, когда оценочные значения параметров шумов известны, наилучшими с точки зрения минимума среднеквадратического критерия, следует считать оценки, полученные с использованием алгоритма дискретного фильтра Калмана, т.к. они не могут быть улучшены ни какими другими процедурами, что было показано в работе [3].

Библиографический список

1. Шульгин А.Ф. Технологические газоздушные системы стендов экспериментальной испытательной базы авиационных двигателей и энергетических установок. / А.Ф. Шульгин, Ю.И. Павлов, В.Г. Попов, В.В. Кулаков. – М.: МАТИ, 2009. – 384 с.
2. Лоскутов А.С., Григорьев А.Н., Кожин Д.В. Испытания ДВС: Учебное пособие. / А.С. Лоскутов, А.Н. Григорьев, Д.В. Кожин. – Йошкар-Ола: Марийский ГТУ, 2007. – С. 136.
3. Скатков А.В. Системное моделирование акторных взаимодействий для облачных сервисов / А.В. Скатков, В.И. Шевченко и [др.] / Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал» (Симферополь), 2018 г. – 420 с.
4. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод и др. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
5. Голикова В.В. Идентификация стохастических объектов и процессов в автоматизированной системе производственных приемосдаточных испытаний двигателей внутреннего сгорания. дис. канд. тех. наук по специальности 05.13.07 / Голикова Виктория Викторовна. – Севастополь: СевНТУ – 2008 г. – 205 с.
6. Голикова В.В., Первухина Е.Л., Сопин П.К. Моделирование измерительных последовательностей диагностических параметров ДВС / В.В. Голикова, Е.Л. Первухина, П.К. Сопин // Двигатели внутреннего сгорания – №2 – 2012 г. С 114 – 117.

7. Pervukhina, E., Emmenegger J.-F. Adaptive time series filters obtained by minimization of the Kullback-Leibler divergence criterion // International Journal of Applied Mathematics, 2005. – Vol. 17. – № 1. – P.69-89.
8. K.A. Marko, J. James, J. Dosdall and J. Murphy, "Automotive Control System Diagnostics Using Neural Nets for Rapid Classification of Large Data Sets", Proceedings DCNN, 11-13, Washington, D.C., 1989.

Bibliograficheskiy spisok

1. SHul'gin A.F. Tekhnologicheskie gazovozdushnye sistemy stendov ehksperimental'noj ispytatel'noj bazy aviacionnyh dvigatelej i ehnergeticheskikh ustanovok./ A.F. SHul'gin, YU.I. Pavlov, V.G. Popov, V.V. Kulakov. – M.: MATI, 2009. – 384 с.
2. Loskutov A.S., Grigor'ev A.N., Kozhin D.V. Ispytaniya DVS: Ucheb-noe posobie. / A.S. Loskutov, A.N. Grigor'ev, D.V. Kozhin. – Josh-kar-Ola: Marijskiy GTU, 2007. – S. 136.
3. Birger I. A. Tekhnicheskaya diagnostika. — M.: Mashinostroenie, 1978. — 240 s.
4. Skatkov A.V. Sistemnoe modelirovanie aktornyh vzaimodejstvij dlya oblachnyh servisov / A.V. Skatkov, V.I. SHEvchenko i [dr.] / Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «Izdatel'stvo Tipografiya «Arial» (Simferopol'), 2018 g. – 420 s.
5. Analiz dannyh i processov: ucheb. posobie / A. A. Barsegyan, M. S. Kupriyanov, I. I. Holod i dr. 3-e izd., pererab. i dop. SPb.: BHV-Peterburg, 2009. 512 s.
6. Golikova V.V. Identifikaciya stohasticheskikh ob"ektov i processov v avtomatizirovannoj sisteme proizvodstvennyh priemosdatochnyh ispytanij dvigatelej vnutrennego sgoraniya. dis. kand. tekhn. nauk po special'nosti 05.13.07 / Golikova Viktoriya Viktorovna. – Sevasto-pol': SevNTU – 2008 g. – 205 s.
7. Golikova V.V., Modelirovanie izme-ritel'nyh posledovatel'nostej diagnosticheskikh parametrov DVS / V.V. Golikova, E.L. Pervukhina, P.K. Sopin // Dvigateli vnutrennego sgoraniya – №2 – 2012 g. S 114 – 117.
8. Pervukhina, E. Adaptive time series filters obtained by minimization of the Kullback-Leibler divergence criterion / E. Pervukhina, J.-F. Emmenegger // International Journal of Applied Mathematics, 2005. – Vol. 17. – № 1. – P.69-89.
9. K.A. Marko, J. James, J. Dosdall and J. Murphy, "Automotive Control System Diagnostics Using Neural Nets for Rapid Classification of Large Data Sets", Proceedings DCNN, 11-13, Washington, D.C., 1989.

¹*Осинов Константин Николаевич, к.т.н., доцент, assistantmm@mail.ru, 299053, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Новиков Владимир Витальевич, д.т.н., профессор, Черноморское высшее военно-морское училище им. П.М. Нахимова. г. Севастополь*

³*Маврин Сергей Анатольевич, к.т.н., Черноморское высшее военно-морское училище им. П.М. Нахимова. г. Севастополь*

POINT EVALUATION OF TECHNICAL CONDITIONS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS

K.N. Osipov, V.V. Novikov, S.A. Mavrin

An approach to the construction of empirical models of complex technical objects and systems, taking into account structural changes in the measurement information, is proposed. The proposed approach is based on the use of modern methods of stochastic modeling of non-stationary processes based on the results of observations of the object

Keywords: statistical modeling, machines' state control, technical parameters

Osipov Konstantin Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, assistentmm@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Novikov Vladimir Vitalievich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

Mavrin Sergey Anatolievich, candidate of technical sciences, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С ОТКЛЮЧЕНИЕМ И УПРЕЖДАЮЩИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ КОМПОНЕНТА

Заморёнов М.В.¹, Федоренко С.Н.², Малицкая А.А.³, Заморёнов И.М.⁴

Аннотация. В данной статье в среде имитационного моделирования GPSS разрабатывается имитационная модель производственной системы, учитывающая влияние контроля и упреждающего восстановления рабочего компонента на ее производительность. Проводится статистическая обработка результатов машинного эксперимента. Выносится суждение о правильности построения математической модели такой системы, путем сравнения результатов аналитического и имитационного моделирования.

Ключевые слова. Имитационная модель, скрытый отказ, машинный эксперимент, технический контроль, упреждающее восстановление.

Стохастическое моделирование является мощным средством анализа технических систем, позволяющим уже на этапе проектирования получать количественные оценки важнейших параметров разрабатываемых систем. Наиболее предпочтительны математические модели, представляющие результат в замкнутом аналитическом виде. Однако, при их построении реальная ситуация требует внесения некоторых допущений и ограничений. Невозможно добиться полным совпадением оператора модели с оператором объекта. Можно только попытаться их максимально сблизить. Поэтому оценка точности модели, а значит и всего прогноза должна быть оценена тем или иным способом. В данном случае выбран способ сравнения аналитической модели с имитационной, для построения которой существуют специальные среды разработки GPSS, AnyLogic и т.д. В противном случае пришлось бы верифицировать модель на основании данных натурных экспериментов, что в большинстве случаев крайне затруднительно и влечет за собой значительные временные и финансовые затраты. Кроме этого, необходимо отметить, что проведение активных натурных экспериментов для сложных систем практически невозможно, в отличие, от машинного эксперимента.

В [1] предложен метод траекторий, как точный метод решения аналогичной задачи. Однако верификация данного метода производилась только при сравнении двух аналитических моделей, что является недостаточным, так как каждая из этих моделей построена при определенных допущениях. Поэтому, наиболее методом верификации является сравнение исследуемой модели с имитационной, в которой наиболее полно отражаются свойства исследуемого объекта или процесса.

Важной особенностью имитационных моделей [2 – 4] является их достоверность, так как они наиболее полно могут описывать происходящие явления. При правильно заданных исходных данных они, практически, не уступают по достоверности натурному эксперименту, однако, их неоспоримым преимуществом являются широкие возможности проведения активного эксперимента, что крайне затруднительно при проведении натуральных экспериментов на действующем оборудовании. Помимо этого, необходимо отметить, что длительность проведения имитационных экспериментов на несколько порядков меньше.

Поэтому целесообразно для верификации вероятностно-аналитических моделей использовать имитационные, проверяющие первые по определенным моментным параметрам, например, по математическому ожиданию.

Целью данной работы является верификация построенной с использованием метода траекторий вероятностно аналитической модели, описывающей функционирование однокомпонентной системы с учетом контроля с отключением и упреждающим восстановлением компонента, посредством сравнения результатов имитационного и аналитического моделирования.

Рассматривается система S , состоящая из одного компонента, выполняющего определенные функции и аппаратуры контроля его работоспособности. Система функционирует следующим образом.

В начальный момент времени компонент приступает к работе, контроль включен. Время безотказной работы компонента – СВ α с функцией распределения (ФР) $F(t) = P\{\alpha \leq t\}$ и плотностью распределения (ПР) $f(t)$. Контроль проводится через случайное время δ с ФР $R(t) = P\{\delta \leq t\}$ и ПР $r(t)$. Отказ компонента обнаруживается только в результате проведения контроля (скрытый отказ), на время проведения контроля работа компонента приостанавливается. Длительность проведения контроля – СВ γ с ФР $V(t) = P\{\gamma \leq t\}$ и ПР $v(t)$. Если в результате проведения контроля установлено, что компонент работоспособен, но его суммарная наработка с момента последнего восстановления не меньше заданного уровня $\mu > 0$, то проводится упреждающее восстановление компонента. В случае, когда суммарная наработка компонента меньше заданного уровня μ , компонент продолжает работу. Если в результате контроля обнаружен скрытый отказ компонента, то проводится его обычное восстановление; время упреждающего или обычного восстановления – СВ β с ФР $G(t) = P\{\beta \leq t\}$ и ПР $g(t)$. На период любого восстановления контроль приостанавливается, после

восстановления все свойства компонента обновляются. Предполагается, что СВ α , β , δ , γ независимы и имеют конечные математические ожидания.

Функционирование системы S опишем ПМП $\xi(t)$ [5, 6] с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний [7, 8]. Введем следующее множество E полумарковских состояний системы:

$$E = \{111, 2\hat{1}0x, 211x, 2\tilde{2}2, 101x, 2\hat{0}0, 222\}.$$

Расшифруем содержательный смысл кодов состояний:

111 – компонент восстановлен и приступил к работе, контроль включен;

$2\hat{1}0x$ – начался контроль, компонент работоспособен и отключен, суммарная наработка компонента с момента последнего его восстановления (без учета времени проведения контроля) равна $x > 0$;

211x – проведен контроль, работоспособный компонент продолжил работу, его суммарная наработка, равная $x > 0$, меньше заданного уровня μ ;

$2\tilde{2}2$ – проведен контроль, компонент работоспособен, его суммарная наработка не меньше заданного уровня μ , началось упреждающее восстановление компонента, контроль приостановлен;

101x – наступил отказ компонента, до контроля осталось время $x > 0$;

$2\hat{0}0$ – начался контроль, компонент, находящийся в отказе, отключен;

222 – проведен контроль, обнаружен отказ и началось обычное восстановление компонента, контроль приостановлен.

Отметим, что в состояниях $2\hat{1}0x$, 211x используется «время назад», а в состоянии 101x «время вперед».

Граф переходов системы [1] изображен на **Рис.1**.

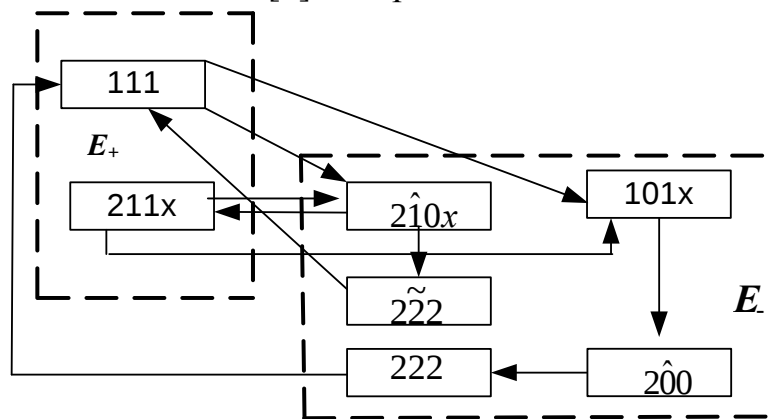


Рис.1 – Граф переходов системы

В [1] найдены ФР времени пребывания в подмножествах вне зависимости от начального состояния:

– для подмножества E_+ :

$$F_{rez}^{+}(t) = P_1^{+} \cdot F_1^{+}(t) + P_2^{+} \cdot F_2^{+}(t).$$

– для подмножества E_- :

$$F_{rez}^{-}(t) = P_1^{-} \cdot F_1^{-}(t) + P_2^{-} \cdot F_2^{-}(t) + P_3^{-} \cdot F_3^{-}(t).$$

где $F_1^{+}(t) = F_{111}(t)$; $F_2^{+}(t) = F_{211}(t)$; $F_1^{-}(t) = F_{101}(t) * F_{200}(t) * F_{222}(t)$;

$F_2^{-}(t) = F_{210}(t)$; $F_3^{-}(t) = F_{210}(t) * F_{222}(t)$; $P_1^{+} = P_{111}$; $P_2^{+} = P_{211}$;

$P_1^{-} = P_{101}$; $P_2^{-} = P_{210} \cdot P_{210}^{211}$; $P_3^{-} = P_{210} \cdot P_{210}^{222}$; $P_{111} = \frac{\rho_{111}}{\rho_{111} + \rho_{211}}$;

$P_{211} = \frac{\rho_{211}}{\rho_{111} + \rho_{211}}$; $P_{101} = \frac{\rho_{101}}{\rho_{101} + \hat{\rho}_{210}^0 + \hat{\rho}_{210}^1}$; $P_{210} = \frac{\hat{\rho}_{210}^0 + \hat{\rho}_{210}^1}{\rho_{101} + \hat{\rho}_{210}^0 + \hat{\rho}_{210}^1}$.

Отсюда несложно рассчитать коэффициент готовности.

В данной работе в среде имитационного моделирования была построена модель исследуемой системы, которая состоит из 5 сегментов.

Сегмент 1 (**Рис.2**) имитирует работу компонента. Так же, перед началом первого сегмента в программе объявляются константы: номер счетчика случайных чисел и суммарная наработка компонента μ .

```
nch equ 1
mu equ 30
generate ,,,1
met1 seize dev
advance 1
release dev
split 1,met1
terminate
```

Рис.2 – Сегмент 1

Сегмент 2 (**Рис.3**) имитирует наработку на отказ компонента и его восстановление. Имитация наработки на отказ осуществляется путем занятия и последующего освобождения транзактом устройства отк. Длительность наработки имитируется в блоках Advance (2 блока Advance с временем задержки, распределенным по экспоненциальному закону, моделируют время задержки, распределенное по обобщенному закону Эрланга 2-го порядка).

```
generate ,,,1
met2 funavail vost
  seize otk
  advance (Exponential(nch,0,45))
  advance (Exponential(nch,0,15))
  release otk
met21 funavail dev
  seize vost
  advance (Exponential(nch,0,0.375))
  advance (Exponential(nch,0,0.125))
  release vost
  favail dev
  favail murab
  favail nekontr
  split 1,met2
  terminate
```

Рис.3 – Сегмент 2

Имитация восстановления производится в устройстве vost. Отметим, что восстановление начинается только тогда, когда контролем был обнаружен отказ, до этого времени транзакт ожидает снятия запрета с устройства vost. После наступления отказа (когда транзакт покидает устройство otk, блокируется устройство dev, имитирующее работу компонента). После восстановления работоспособности компонента, разблокируются устройства dev, murab, nekontr.

Сегмент 3 (Рис.4) имитирует время между проведениями контроля и, собственно, контроль работоспособности основного компонента. Имитация времени ожидания между проведениями контроля осуществляется путем занятия и последующего освобождения транзактом устройства nekontr. Имитация проведения контроля производится в устройстве kontr. После проведения контроля, если основной компонент отказал, разблокируется устройство vost, для проведения восстановления компонента.

```
generate ,,,1
met3 seize nekontr
  advance (Exponential(nch,0,12))
  advance (Exponential(nch,0,4))
  release nekontr
  funavail nekontr
  seize kontr
  advance (Exponential(nch,0,0.15))
  advance (Exponential(nch,0,0.05))
  release kontr
  gate nu otk,met31
  favail vost
  met31 transfer ,met3
```

Рис.4 – Сегмент 3

Сегмент 4 (**Рис.5**) имитирует контроль суммарной наработки компонента μ в устройстве murab. Когда транзакт покидает это устройство, сбрасывается наработка на отказ и начинается восстановление.

```
generate ,,,1
met4 seize murab
advance mu
release murab
funavail murab
preempt otk,,met21,,re
return otk
favail vost
transfer ,met4
```

Рис.5 – Сегмент 4

Сегмент 5 (**Рис.6**) представляет собой таймер, определяющий длительность моделирования работы всей системы.

```
generate 10000
terminate 1
```

Рис.6 – Сегмент 5

Результаты имитационного моделирования приведены на **Рис.7**.

Коэффициент готовности исследуемой системы составил 0,884, тогда как в аналитической модели [1], при таких же исходных данных получилось 0,859. Относительная погрешность результатов моделирования составила 2,8%.

FACILITY	ENTRIES	UTIL	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
DEV	8838	0.884	1.000	1	9199	0	0	0	0
VOST	357	0.017	0.486	0	0	0	0	0	0
OTK	686	0.884	12.883	1	9197	0	0	0	0
NEKONTR	296	0.513	17.345	1	3	0	0	0	0
MURAB	329	0.984	29.915	1	4	0	0	0	0
KONTR	295	0.006	0.212	1	0	0	0	0	0

Рис.7 – Результаты имитационного моделирования

Полученные результаты позволяют вынести суждение о правильности построения моделей и возможности их применения при разработке и модернизации технических систем с аналогичными структурами.

В дальнейших исследованиях планируется провести исследования оптимального распределения времени между проведениями контроля для повышения коэффициента готовности системы.

Библиографический список

1. Заморёнов М.В. Модель контроля системы с отключением и упреждающим восстановлением компонента / Заморёнов М.В., Копп В.Я., Заморёнова Д.В., Федоренко С.Н. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 11-1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. –С. 298-308.
2. Советов Б.Я. Моделирование систем: Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов по спец. АСУ / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1988. – 135 с.
3. Томашевский В.Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.
4. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS / Т.Дж. Шрайбер; [пер. с англ. В.И. Гарчера, И.Л. Шмуйловича]; под ред. М.А. Файнберг. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
5. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / Королюк В.С., Турбин А.Ф. – Киев: Наук. думка, 1982. – 236 с.
6. Королюк В.С. Стохастические модели систем. / В.С. Королюк. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.
7. Королюк В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления / В.С. Королюк // Кибернетика. 1981. №4. – С. 121 – 124.
8. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1976. – 181 с.

Bibliograficheskiy spisok.

1. Zamoryonov M.V. Model' kontrolya sistemy s otklyucheniem i uprezhdayushchim vosstanovleniem komponenta / Zamoryonov M.V., Kopp V.YA., Zamoryonova D.V., Fedorenko S.N. // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 11-1. Tula: Izd-vo TulGU, 2017. –S. 298-308.
2. Sovetov B.YA. Modelirovanie sistem: Kursovoe proektirovanie: Ucheb. posobie dlya vuzov po spec. ASU / B.YA. Sovetov, S.A. YAkovlev. – M.: Vyssh. shk., 1988. – 135 s.
3. Tomashevskij V.N. Imitacionnoe modelirovanie v srede GPSS / V.N. Tomashevskij, E.G. ZHdanova. – M.: Bestseller, 2003. – 416 s.
4. SHrajber T.Dzh. Modelirovanie na GPSS / T.Dzh. SHrajber; [per. s angl. V.I. Garchera, I.L. SHmujlovicha]; pod red. M.A. Fajnberg. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 592 s.
5. Korolyuk V.S. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem / Korolyuk V.S., Turbin A.F. – Kiev: Nauk. dumka, 1982. – 236 s.

6. Korolyuk V.S. Stohasticheskie modeli sistem. / V.S. Korolyuk. – Kiev: Nauk. dumka, 1989. – 208 s.
7. Korolyuk V.S. Superpoziciya processov markovskogo vosstanovleniya / V.S. Korolyuk // Kibernetika. 1981. №4. – S. 121 – 124.
8. Korolyuk V.S. Polumarkovskie processy i ih prilozheniya / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: Nauk. Dumka, 1976. – 181 s.

¹Заморёнов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент,
zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастопольский государственный университет,

²Федоренко Сергей Николаевич, старший преподаватель,
sergey.fedor@mail.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

³Малицкая Александра Александровна, ассистент,
malitskaya@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁴Заморёнов Илья Михайлович, студент, ilia.zamoryonov@gmail.com,
Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

SIMULATION MODEL OF CONTROL OF A SINGLE-COMPONENT SYSTEM WITH SHUTDOWN AND PREVENTIVE RECOVERY OF A COMPONENT

M.V. Zamoryonov, S.N. Fedorenko, A.A. Malitskaia, I.M. Zamoryonov

In this article, in the GPSS simulation environment, a simulation model of a production system is developed that takes into account the impact of control and proactive restoration of a working component on its performance. Statistical processing of the results of a machine experiment is carried out. A judgment is made on the correctness of constructing a mathematical model of such a system by comparing the results of analytical and simulation modeling.

Keywords: simulation model, latent failure, machine experiment, engineering control, anticipatory recovery.

Zamoryonov Mikhail Vadimovich, Candidate of Technical Sciences, docent, zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol national university,

Fedorenko Sergey Nikolaevich, Senior Lecturer, sergey.fedor@mail.ru, Russia, Sevastopol national university.

*Malitskaia Aleksandra Aleksandrovna, Assistant, malitskaya@sevsu.ru,
Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Zamoryonov Ilia Mikhailovich, student, ilia.zamoryonov@gmail.com,
Russia, Sevastopol, Sevastopol state University*

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.2.08

ПРИБОР ДЛЯ СОПРЯЖЕННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Васютенко А. П.¹, Заморонова Д.В.²

Аннотация. Приведены характеристики технологического процесса, сопряженного шлифования деталей, область применения, достоинства, пути повышения точности обработки. Дана схема и описание принципа действия прибора активного контроля для сопряженного шлифования на базе пневматических преобразователей высокой чувствительности с двумя регулируемыми соплами. Приведены: схема преобразователя, выражение, описывающие его статическую характеристику, методика расчета диаметра измерительного сопла.

Ключевые слова. Пневматический преобразователь, сопряженное шлифование, чувствительность, прибор.

Сопряженное шлифование предусматривает обработку одной из сопрягаемых деталей (например, плунжера) под размер уже готовой втулки с целью обеспечения заданного зазора в соединении. Сопряженное шлифование используется в условиях серийного и мелкосерийного производств при высоких требованиях к точности обработки, а следовательно, и к точности измерения. При этом применение селективной сборки экономически не целесообразно в следствие наличия значительного объема незавершенного производства [1 – 3].

Для ответственных сопряжений деталей зазор в соединении должен лежать в пределах 2...8 мкм. Допуск зазора TS определяется суммой допусков сопрягаемых деталей (плунжера Td и втулки TD)

$$TS = Td + TD \quad (1)$$

Если, например, $Td = 8$ мкм, $TD = 10$ мкм для 5-го и 6-го квалитетов диаметра 20мм, то допуск зазора составит 18 мкм, что в 2...8 раз превышает величину зазора S . В связи с этим возникает необходимость повышения точности и чувствительности измерительных преобразователей приборов для сопряженного шлифования.

Цель работы. Повышение чувствительности и точности пневматических преобразователей на основе совершенствования их схемы и принципа действия. Выбор пневматических преобразователей определяется их малыми габаритными размерами, простотой конструкции, нечувствительностью к вибрациям, действию охлаждающей жидкости и

внешних магнитных полей, что важно при проектировании приборов активного контроля.

На **Рис.1** показана схема прибора активного контроля для сопряженного шлифования, формирующего управляющие команды «переход с чернового шлифования на чистовое», «переход с чистового шлифования на выхаживание», «конец обработки» в схему кругло-шлифовального станка.

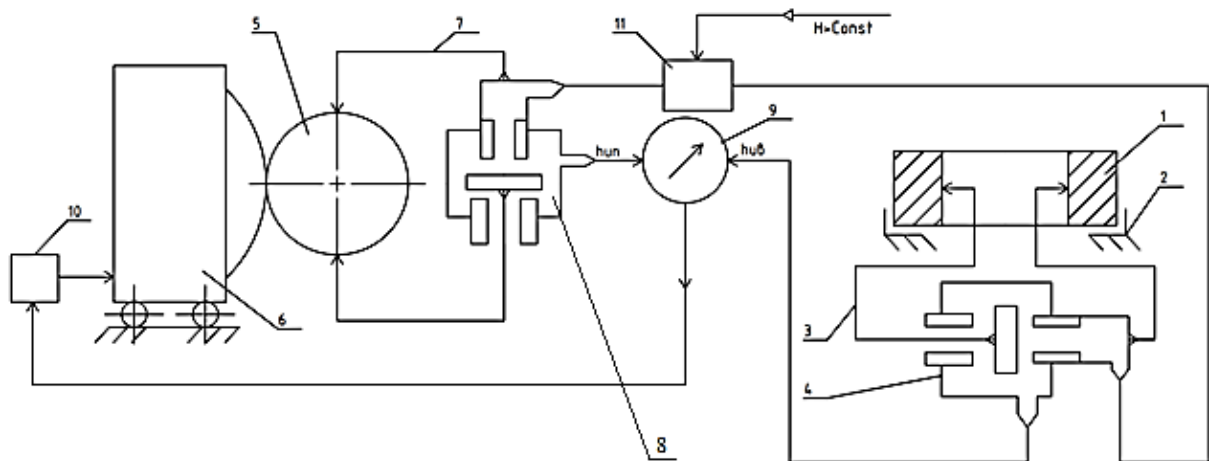


Рис.1 – Схема прибора для сопряженного шлифования

Принцип действия прибора следующий. Уже обработанная втулка 1 устанавливается на столик 2 и скоба 3 с помощью пневматического преобразователя 4 с регулируемым входным и измерительным соплами контролирует её внутренний диаметр. В центрах кругло-шлифовального станка устанавливается заготовка плунжера 5, диаметр которой в процессе шлифования кругом 6 измеряется скобой 7 с преобразователем 8. Сигналы с преобразователей 4 и 8 (измерительные давления воздуха $h_{ив}$ и $h_{ип}$) поступают на входы сильфонного пневмоэлектронного преобразователя 9, который подаёт управляющие команды на исполнительный механизм 10 перемещения шлифовальной бабки [4, 5].

Особенностью конструкции пневматических преобразователей 4 и 8 является соосное расположение входного 4 и измерительного 1 сопел (**Рис.2**), между которыми заслонка 3 изменяющая зазоры $Z1$ и $Z2$, а, следовательно, и площади проходных сечений сопел 1 и 4 при своём перемещении. Перемещение измерительного штока 2, заслонки 3 и корпуса 5 преобразователя зависят от диаметра обрабатываемой детали 7.

Зависимость, описывающая статическую характеристику преобразователя $h = f(Z)$ имеет вид

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2 Z}{(d_1^2 - 4d_1 Z)} \right)^2} \quad (2)$$

где H – рабочее давление воздуха; Z – зазор между заслонкой и соплом; d_1 – диаметр входного сопла; d_2 – диаметр измерительного сопла.

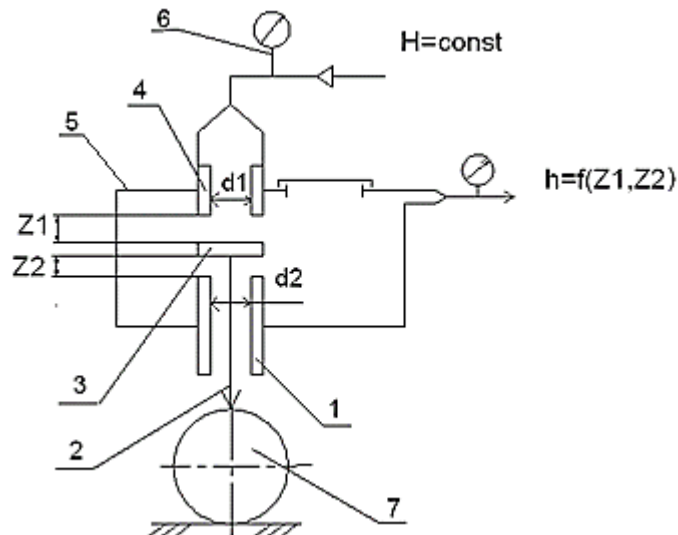


Рис.2 – Схема пневматического преобразователя

1 – измерительный входное сопло, 2 – измерительный шток, 3 – заслонка, 4 – входное сопло, 5 – корпус преобразователя, 6 – манометр для измерения рабочего давления, 7- деталь

Для измерительного цилиндрического сопла максимальная площадь проходного сечения вычисляется по формуле:

$$F_{2\max} = \pi d_2^2 / 4. \quad (3)$$

В обычных пневматических преобразователях диаметр измерительного сопла равен 2 мм, а максимальная площадь проходного сечения $F_{2\max} = 3,14\text{ мм}^2$. Так как в отверстии измерительного сопла 1 (Рис. 2) находится измерительный шток 2, то диаметр d_2 должен быть рассчитан с учетом равенства проходных сечений сопла со штоком F_2' и обычного измерительного сопла $F_2' = F_2$

$$F_2' = \frac{\pi(d_2')^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4)$$

где $d=1 \dots 1,5$ мм – диаметр штока.

Принимаем $d=1$ мм. Подставим это значение в выражение 4 и определим из него d_2'

$$d_2' = \sqrt{\frac{4 \left(F_2 + \frac{\pi d^2}{4} \right)}{\pi}}. \quad (5)$$

При $F_2 = 3,14 \text{ мм}^2$ ($d_2 = 2 \text{ мм}$) и $d=1 \text{ мм}$ получаем

$$d_2' = \sqrt{4 \left(\frac{3,14 + \frac{3,14 \cdot 1^2}{4}}{3,14} \right)} = \sqrt{4 \left(1 + \frac{1}{4} \right)} = \sqrt{5} \text{ (мм)}. \quad (6)$$

Подставив в формулу 2 вместо d_2 диаметр $d_2' = \sqrt{5}$ получим выражение для расчета статической характеристики сопла

$$h = H / \left[1 + 80 Z^2 / (d_1^2 - 4 d_1 Z)^2 \right]. \quad (7)$$

Исследуемый преобразователь обладает более высокой чувствительностью, т.к. при уменьшении диаметра обрабатываемой детали и взаимном перемещении заслонки (3) и корпуса (5) преобразователя (**Рис.2**), площадь проходного сечения измерительного сопла будет увеличиваться, а входного сопла уменьшаться, что приведет к двойному уменьшению измерительного давления Δh_u .

Чтобы получить выражение для расчета чувствительности K_Z пневматической измерительной системы необходимо продифференцировать выражение (7) относительно переменной Z :

$$K_Z = \frac{dh}{dZ}.$$

Формула для определения чувствительности первичного пневматического преобразователя с двумя соосными соплами с регулируемой площадью проходного сечения имеет вид:

$$K_Z = - \frac{2 H d_1 d_2 \left(\frac{d_1}{4} + Z \right)}{\left[1 + \left(\frac{d_2 Z}{\frac{d_1^2}{4} - d_1 Z} \right)^2 \right]^2 \left(\frac{d_1^2}{4} - d_1 Z \right)^2}. \quad (8)$$

В дальнейшем представляет интерес выполнить моделирование статических характеристик преобразователя при различных сочетаниях

конструктивных параметров и рабочих давлений воздуха, определить значения прямолинейных участков характеристик и чувствительности, дать сравнительную оценку метрологических характеристик преобразователей, построенных по обычной схеме с одним регулируемым соплом и преобразователем с двумя регулируемыми соплами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-08-00825 А.

Библиографический список

1. Ахмеджанов Р.А. Физические основы получения информации: учебное пособие / Р.А. Ахмеджанов, А.И. Чередов. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 212 с.
2. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебн. пособие / А.Е. Гольдштейн. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.
3. Пневматические устройства и системы в машиностроении. Справочник / А.И. Рабинович. – К.: Техника, 1970. – 396с.
4. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении / В.П. Легаев. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с.
5. Этингوف М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М.И. Этингوف. – М.: АПР, 2016. – 336 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. 1. Ahmedzhanov R.A. Fizicheskie osnovy polucheniya informacii: uchebnoe posobie / R.A. Ahmedzhanov, A.I. CHeredov. – М.: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2013. – 212 s.
2. 2. Gol'dshtejn A.E. Fizicheskie osnovy izmeritel'nyh preobrazovanij: uchebn. posobie / A.E. Gol'dshchtejn. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2008. – 253 s.
3. 3. Pnevmaticheskie ustrojstva i sistemy v mashinostroenii. Spravochnik / A.I. Rabinovich. – К.: Tekhnika, 1970. – 396s.
4. 4. Legaev V.P. Pribory avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya v mashinostroenii / V.P. Legaev. Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009. – 123 s.
5. Etingof M.I. Avtomaticheskij razmernyj kontrol' na metallorezhushchih stankah / M.I. Etingof. – М.: APR, 2016. – 336 s.

¹*Васютенко Александр Павлович, к.т.н., доцент,
vasutenko50@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

²*Заморёнова Дарья Викторовна, к.т.н., доцент, zamik@ukr.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

CONNECTED GRINDER

A.P. Vasyutenko, D.V. Zamoryonova

The characteristics of the technological process, coupled grinding of parts, the area of application, advantages, ways of increasing the processing accuracy are given. A diagram and a description of the principle of operation of an active control device for conjugate grinding based on pneumatic transducers of high sensitivity with two adjustable nozzles are given. The diagram of the transducer, the expression describing its static characteristic, the method for calculating the diameter of the measuring nozzle are given.

Keywords: pneumatic transducer, coupled grinding, sensitivity, instrument.

Vasyutenko Alexander Pavlovich, candidate of technical science, docent, vasutenko50@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University,

Zamoryonova Darya Viktorovna, candidate of technical science, docent, zamik@ukr.net, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НА ПРОЦЕСС СОРТИРОВКИ ПО СЕЛЕКТИВНЫМ ГРУППАМ

Филипович О.В.¹, Невар Г.В.², Волошина Н.А.³, Балакина Н.А.⁴

Аннотация. Рассматривается процесс однопараметрической сортировки элементов по группам для их дальнейшей селективной сборки. Построена аналитическая модель, позволяющая учесть влияние погрешности измерения на показатели сортировочного процесса. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова. Математическая модель, селективная сборка, сортировка, погрешность измерения.

Рассматривается процесс сортировки элементов по группам для их последующей селективной сборки по параметру x_i (i – индекс элемента), изготавливаемых партией. Параметры x_i , по которым происходит сопряжение, являются случайными величинами (СВ), имеющими плотности распределения $f_{1i}(x_i)$, а также конечные начальные и центральные моменты распределения хотя бы первых двух порядков.

Предположим, что параметр x_i имеет расширенный допуск на изготовление X_i . Перед сборкой элементы по указанным параметрам сортируют по группам с интервалами групповых допусков $X_i^{(k_i)}$, где k_i – номер селективной группы. Границы селективных групп $a_i^{(k_i)}$ разбивают всю область значений параметров X_i на l_i интервалов $X_i^{(k_i)}$. Отбраковка убирает элементы из крайних групп с большими отклонениями параметров из процессов комплектования и сборки.

Ключевым этапом селективной сборки изделий является сортировка элементов на группы. Их контроль сопровождается случайными ошибками, появление которых приводит к тому, что вместо истинного значения параметра x_i в процессе измерения становится известной величина z_i , обычно связанная с исходной зависимостью [1...3]:

$$z_i = x_i + \delta_i,$$

где δ_i – случайная составляющая погрешности измерения i -го параметра, имеющая плотность распределения $f_{2i}(\delta_i)$. Действительное значение параметра в случае независимости величин x_i и δ_i имеет плотность распределения

$$f_{3i}(z_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{1i}(x_i - k) f_{2i}(k) dk = f_{1i}(x_i) * f_{2i}(\delta_i),$$

где* – оператор свертки.

В результате сортировки по действительным значениям параметра z_i могут возникнуть ошибки: попадание элемента в одну из соседних селективных групп вместо требуемой группы, куда бы он попал при проведении сортировки по истинным значениям при $\delta_i \rightarrow 0$.

На **Рис.1** приведено графическое отображение кривых распределения размеров деталей и погрешностей измерений с центрами, совпадающими с границами групповых допусков.

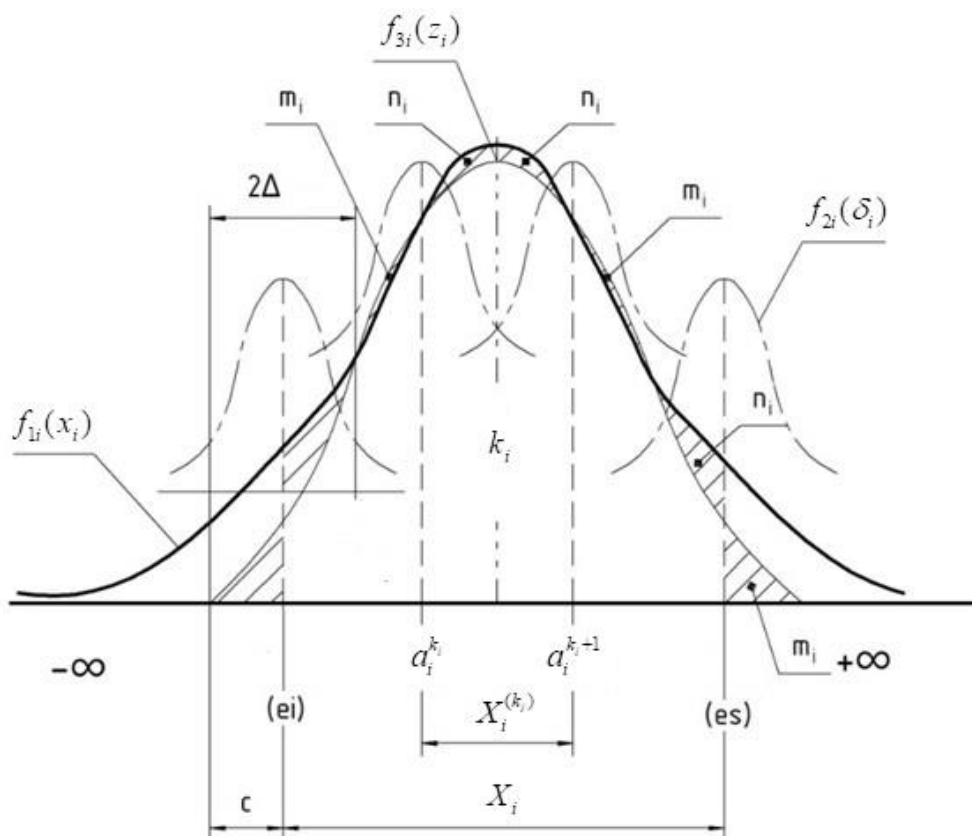


Рис.1 – Кривые распределения контролируемых параметров, построенные с учетом погрешностей измерения:
 es, ei – предельные значения контролируемого размера; Δ – предел погрешности измерения; m – область вероятностей неправильно принятых элементов (ошибка второго рода); n – область вероятностей неправильно забракованных элементов (ошибка первого рода); c – значение выхода за предельные границы групповых допусков у неправильно принятых элементов

В результате наложения кривых распределения истинных значений параметров элементов $f_{1i}(x_i)$ и погрешностей измерений $f_{2i}(\delta_i)$ происходит искажение кривой распределения $f_{3i}(z_i)$ и появляются области вероятностей неправильно принятых и неправильно забракованных элементов.

Ошибки сортировки в дальнейшем будут сказываться на качестве изделий: изделия, полученные из таких элементов, с вероятностью, близкой к единице, будут заведомо бракованными по выходному показателю. Очевидно, что вероятность получения таких событий будет тем меньше, чем меньше величина погрешности измерения.

Рассмотрим совокупность случайных событий:

– $A(\bar{A})$: истинное значение параметра x_i принадлежит (не принадлежит) селективной группе k_i ;

– $B(\bar{B})$: действительное значение параметра z_i принадлежит (не принадлежит) селективной группе k_i .

Аналитическое определение вероятностей аналогичных событий при проведении приемочного контроля с целью предварительной отбраковки, описано в работе [3]. Особенности учета погрешностей измерения на показатели сборочного процесса, определяемые при помощи имитационного моделирования, подробно описаны в [4...6]. Целью данной работы является разработка аналитической модели, позволяющей оценить влияние погрешностей измерения при сортировке элементов на селективные группы по одному параметру.

Рассмотрим селективную группу k_i . Обозначив верхнюю и нижнюю границу группы через $a_i^{k_i}$ и $a_i^{k_i+1}$, опустив для упрощения индекс « i » в данном обозначении, что справедливо для дальнейшего одновариантного комплектования, запишем вероятности событий:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{AB}^{k_i} &= P\{a^k \leq x \leq a^{k+1}; a^k \leq z \leq a^{k+1}\} = P\{a^k \leq x \leq a^{k+1}; a^k - x \leq \delta \leq a^{k+1} - x\}; \\ P_{A\bar{B}}^{k_i} &= P\{a^k \leq x \leq a^{k+1}; z < a^k\} + P\{a^k \leq x \leq a^{k+1}; z > a^{k+1}\} = \\ &= P\{a^k \leq x \leq a^{k+1}; \delta < a^k - x\} + P\{a^k \leq x \leq a^{k+1}; \delta > a^{k+1} - x\}; \\ P_{\bar{A}B}^{k_i} &= P\{x < a^k; a^k \leq z \leq a^{k+1}\} + P\{x > a^{k+1}; a^k \leq z \leq a^{k+1}\} = \\ &= P\{x < a^k; a^k - x \leq \delta \leq a^{k+1} - x\} + P\{x > a^{k+1}; a^k - x \leq \delta \leq a^{k+1} - x\}; \\ P_{\bar{A}\bar{B}}^{k_i} &= P\{x < a^k; z < a^k\} + P\{x > a^{k+1}; z > a^{k+1}\} = \\ &= P\{x < a^k; \delta < a^k - x\} + P\{x > a^{k+1}; \delta > a^{k+1} - x\}. \end{aligned} \right.$$

Первое выражение соответствует случаю, когда истинное и действительное значения параметров лежат в пределах границ рассматриваемой селективной группы, последнее – за пределами.

Промежуточные выражения характеризуют ошибочную разбраковку.

Данные вероятности можно представить в интегральной форме:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{AB}^{k_i} &= \int_{a^k}^{a^{k+1}} f_1(x) \int_{a^{k-x}}^{a^{k+1-x}} f_2(\delta) d\delta dx; \\ P_{AB}^{k_i} &= \int_{a^k}^{a^{k+1}} f_1(x) \int_{-\infty}^{a^{k-x}} f_2(\delta) d\delta dx + \int_{a^k}^{a^{k+1}} f_1(x) \int_{a^{k+1-x}}^{\infty} f_2(\delta) d\delta dx = \\ &= \int_{a^k}^{a^{k+1}} f_1(x) \left(\int_{-\infty}^{a^{k-x}} f_2(\delta) d\delta + \int_{a^{k+1-x}}^{+\infty} f_2(\delta) d\delta \right) dx; \\ P_{AB}^{k_i} &= \int_{-\infty}^{a^k} f_1(x) \int_{a^{k-x}}^{a^{k+1-x}} f_2(\delta) d\delta dx + \int_{a^{k+1}}^{\infty} f_1(x) \int_{a^{k-x}}^{a^{k+1-x}} f_2(\delta) d\delta dx; \\ P_{AB}^{k_i} &= \int_{-\infty}^{a^k} f_1(x) \int_{-\infty}^{a^{k-x}} f_2(\delta) d\delta dx + \int_{a^{k+1}}^{+\infty} f_1(x) \int_{a^{k+1-x}}^{+\infty} f_2(\delta) d\delta dx. \end{aligned} \right.$$

Вероятность пребывания годных элементов в селективной группе k_i равна $P_{AB}^{k_i}$. В данную группу в результате ошибочной разбраковки будут попадать элементы из соседних групп с вероятностями

$$\begin{aligned} - \tilde{P}_{AB}^{k_i+1} &= \int_{a^{k+1}}^{a^{k+2}} f_1(x) \int_{-\infty}^{a^{k+1-x}} f_2(\delta) d\delta dx \quad (k_{i+1} \rightarrow k_i); \\ - \tilde{P}_{AB}^{k_i-1} &= \int_{a^{k-1}}^{a^k} f_1(x) \int_{a^{k-x}}^{\infty} f_2(\delta) d\delta dx \quad (k_{i-1} \rightarrow k_i). \end{aligned}$$

Сумма этих вероятностей будет определять количество элементов в группе. Указанный процесс иллюстрирует **Рис. 2**.

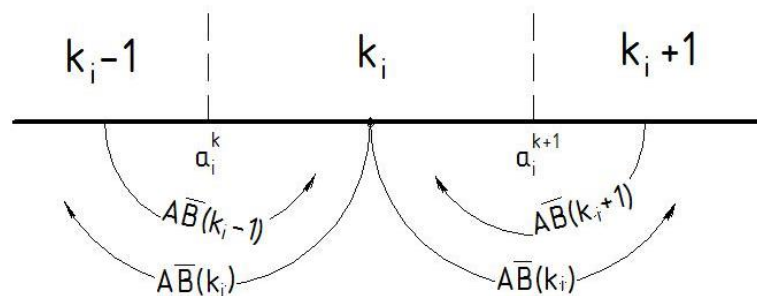


Рис.2 – Графическое изображение распределения элементов в селективной группе k_i

Приведем пример моделирования. Под элементом здесь будем понимать деталь, под его параметром – линейный размер, индекс « i » для удобства опущен. Предположим, что распределения значений параметров элементов и

погрешности измерения – гауссовские, имеющие плотности

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad f_2(\delta) = \frac{1}{\sigma_\delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\delta-m_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}},$$

где m_x и σ_x – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины x , m_δ и σ_δ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины δ . Для рассматриваемого примера в качестве исходных данных примем следующее.

1. Номинальный размер равен 20 мм, величина расширенного допуска $X=12$, мкм с координатой середины интервала 6 мкм. Количество селективных групп $l=5$, количество групп годных равно 3. Групповые допуски $X^{(k)}$ равны между собой.

2. Математические ожидания $m_x = 20,006$ мм; $m_\delta = 0$ мм; среднеквадратические отклонения $\sigma_x = 0,002$ мм;

$$\sigma_\delta = \frac{\Delta}{c_\Delta},$$

где Δ – погрешность измерения, $\Delta = c_x X^{(k)}$, c_Δ – коэффициент.

Проведем исследования влияния прецизионности измерения [7] на результаты сортировки. Предположим, что коэффициент c_x варьируется в пределах от 0,025 до 0,5 при $c_\Delta = 2$. График зависимости суммарной вероятности P_{AB} по всем селективным группам годных от величины погрешности Δ показан на **Рис.3**.

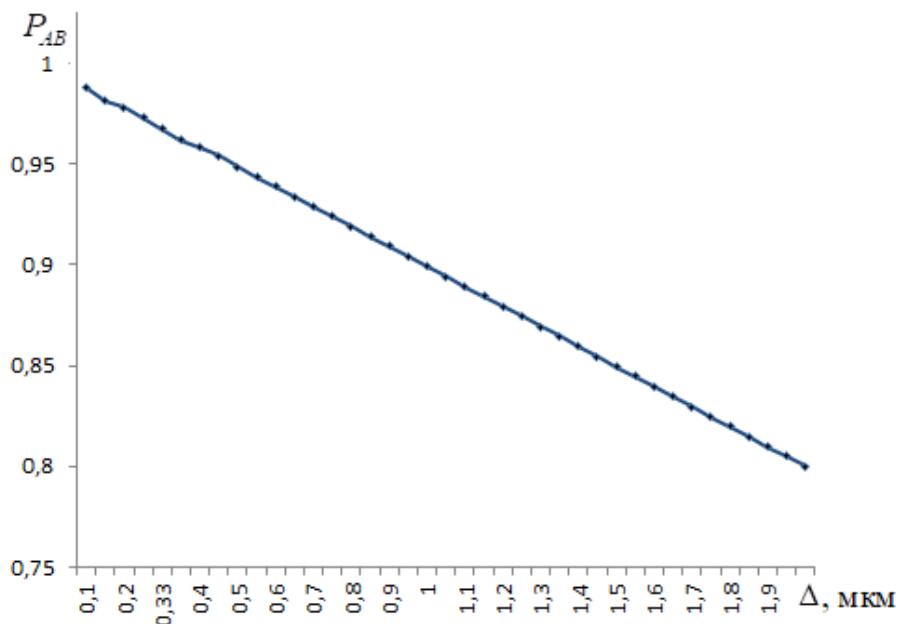


Рис.3 – График зависимости P_{AB} от Δ

Таким образом, построенная модель позволяет производить анализ показателей сортировочного процесса с учетом погрешностей измерения параметра, по которому производится сортировка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-08-00825 А.

Библиографический список

1. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений /П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
2. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. – 6-е изд., пераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
3. Бородачев Н.А. Основные вопросы теории точности производства / Н.А. Бородачев. – М.: Издательство АН СССР, 1950. – 196 с.
4. Филипович О.В. Оценка влияния погрешности измерения на показатели селективной сборки с помощью имитационного моделирования / О.В. Филипович, Г.В. Невар // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. – № 9-1. – Тула: Изд-во ТулГУ. – С. 428-437.
5. Филипович О.В. Имитационная модель двухпараметрической селективной сборки с учетом погрешностей измерения параметров / О. В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2019. – № 4(8). – С. 89-94.
6. Filipovich O. Model of Information-Measuring System Used for Two-Parameter Selective Assembly Control / O. Filipovich, V. Filipovich // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01–04 октября 2019 года. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8934764. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934764.
7. РМГ 29-2013. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 60 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Novickij P.V. Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij /P.V. Novickij, I.A. Zograf. – L.: Energoatomizdat, 1991. – 304 s.
2. YAkushev A.I. Vzaimozamenyaemost', standartizaciya i tekhnicheskie izmereniya /A.I. YAkushev, L.N. Voroncov, N.M. Fedotov. – 6-e izd., perab. i dop. – М.: Mashinostroenie, 1987. – 352 s.

3. Borodachev, N.A. Osnovnye voprosy teorii tochnosti proizvodstva [Tekst] / N.A. Borodachev. – M.: Izdatel'stvo AN SSSR, 1950. – 196 s.

4. Filipovich O.V. Ocenka vliyaniya pogreshnosti izmereniya na pokazateli selektivnoj sborki s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya / O.V. Filipovich, G.V. Nevar // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2017. – № 9-1. – Tula: Izd-vo TulGU. – S. 428-437.

5. Filipovich O.V. Imitacionnaya model' dvuhparametricheskoj selektivnoj sborki s uchetom pogreshnostej izmereniya parametrov / O. V. Filipovich // Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2019. – № 4(8). – S. 89-94.

6. Filipovich O. Model of Information-Measuring System Used for Two-Parameter Selective Assembly Control / O. Filipovich, V. Filipovich // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01–04 oktyabrya 2019 goda. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8934764. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934764.

7. RMG 29-2013. Rekomendatsii po mezhgosudarstvennoj standartizatsii. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya. – M.: Standartinflorm, 2014. – 60 s.

¹Филипович Олег Викторович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», ophis1@yandex.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

²Невар Галина Валерьевна, инженер, GalinaNevar@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Волошина Наталия Александровна, к.т.н., доцент, imperiya_001@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁴Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель, 040578@rambler.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF MEASUREMENT ERROR ON THE SORTING PROCESS BY SELECTIVE GROUPS

Filipovich O.V., Nevar G.V., Voloshina N.A., Balakina N.A.

The process of one-parameter sorting of elements into groups for their further selective assembly is considered. An analytical model has been built that allows to take into account the influence of the measurement error on the

indicators of the sorting process. The simulation results are presented.

Keywords: mathematical model, selective assembly, sorting, measurement error.

Filipovich Oleg Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Instrument Systems and Automation Technological Processes, ophisl@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

Nevar Galina Valeryevna, engineer, GalinaNevar@yandex.ru, Russian Federation, Sevastopol, Sevastopol State University

Voloshina Nataliya Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences, Docent, , imperiya_001@mail.ru, Russia, Sevastopol State University

Balakina Natalya Anatolyevna, Senior Lecturer, 040578@rambler.ru, Russian, Sevastopol State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СООСНОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ

Заморёнова Д.В.¹, Васютенко А.П.²

Аннотация. Приведена схема и описание принципа работы пневматической контактной головки, сформулирована цель работы – определение метрологических характеристик на основе моделирования зависимости измерительного давления воздуха от зазора между соплом и заслонкой при различных сочетаниях исходных параметров. Определены значения прямолинейных участков характеристик и чувствительности, приведены их зависимости от диаметров входного сопла при различных значениях рабочего давления воздуха.

Ключевые слова. Пневматическая головка, чувствительность, диапазон измерения, моделирование.

Пневматические приборы обладают высокой точностью, позволяют проводить дистанционные измерения; малогабаритная пневматическая измерительная оснастка позволяет производить измерения в относительно труднодоступных местах и создавать наиболее простые конструкции измерительных устройств для контроля практически любые линейных параметров деталей [1]. В зависимости от вида контролируемого параметра детали, условий измерения и ряда других факторов используются различные типы первичных пневматических преобразователей с регулируемым проходным сечением измерительного сопла (**Рис.1**) [1, 2].

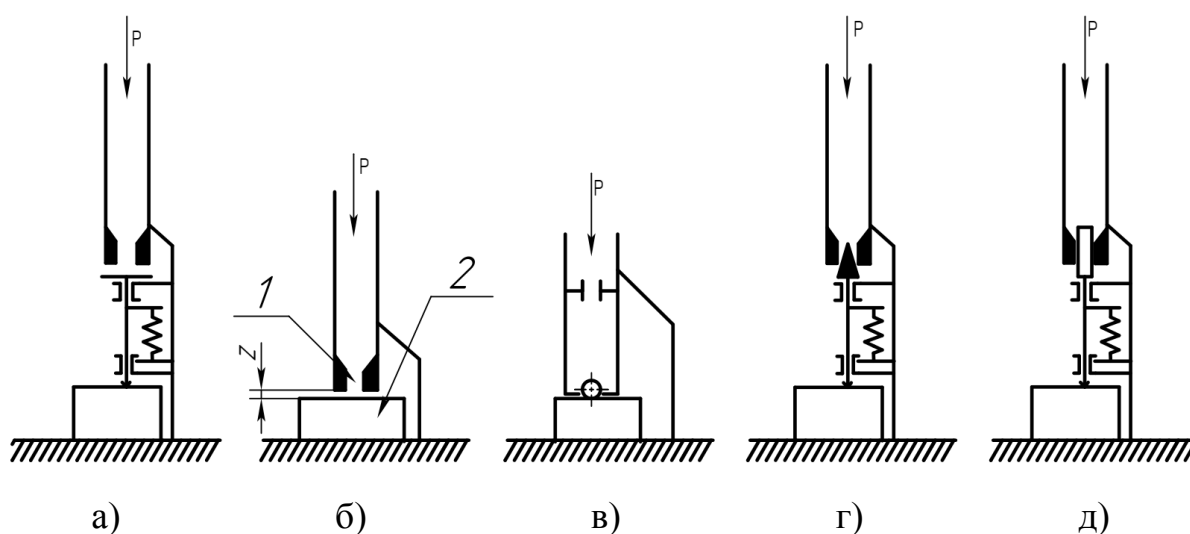


Рис.1 – Схемы первичных пневматических преобразователей

Наиболее простым по конструкции является преобразователь типа «сопло-плоская заслонка» (**Рис.1а**), реализующий контактный способ измерения. Если в качестве заслонки используется поверхность контролируемой детали, то обеспечивается бесконтактное измерение деталей (**Рис.1б**) малой жесткости, или выполненных из легкодеформируемых материалов. Шариковые сопла (**Рис.1в**) обеспечивают высокую износостойкость контактной поверхности измерительного штока и малое измерительное усилие. Преобразователи с конической заслонкой (**Рис.1г**) значительно расширяют диапазон измерения и используется в пневматических мембранных преобразователях компенсационного типа. Преобразователи плунжерного типа (**Рис.1д**) имеют широкий диапазон измерения, обеспечивают ламинарный режим течения воздуха, линейную статическую характеристику, но невысокую чувствительность.

Конструктивно пневматическое сопло и заслонка могут выполняться в общем корпусе в виде контактной измерительной головки, что обеспечивает более высокую точность сборки первичного преобразователя (**Рис.2**) [3,4].

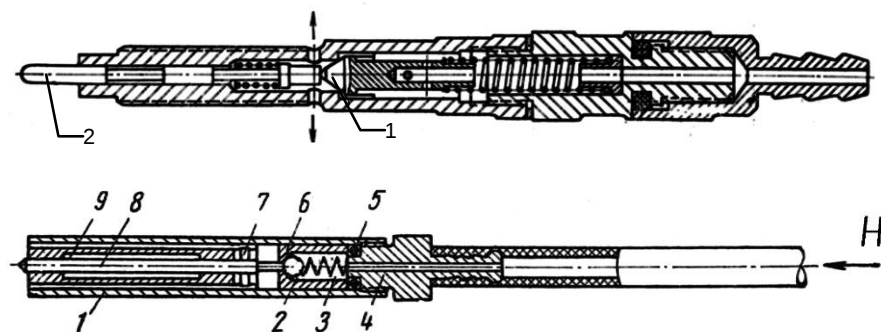


Рис.2 – Контактные измерительные головки

Цель исследования – моделирование статической характеристики соосной пневматической контактной головки, определение чувствительности и диапазона измерения.

В исследуемой пневматической измерительной системе переменными являются площади проходного сечения входного, и измерительного сопел.

Принципиальная схема контактной головки с регулируемыми входным и измерительным соплами представлена на **Рис.3**. Принцип действия следующий. С поверхностью контролируемой детали контактирует измерительный шток 4 пневматической головки, в которой установлена заслонка 3, взаимодействующая с входным соплом 1 и измерительным соплом 2. В зависимости от диаметра контролируемой

детали изменяется величина зазоров Z_1 между заслонкой 3 и измерительным соплом 2 и Z_2 между заслонкой 3 и входным соплом 1, что приводит к изменению давления h в измерительной ветви.

Зависимость, описывающая статическую характеристику преобразователя $h = f(Z)$ имеет вид

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2 Z}{(d_1^2 - 4d_1 Z)} \right)^2},$$

где H – рабочее давление воздуха, Z – зазор между заслонкой и соплом, d_1 – диаметр входного сопла, d_2 – диаметр измерительного сопла.

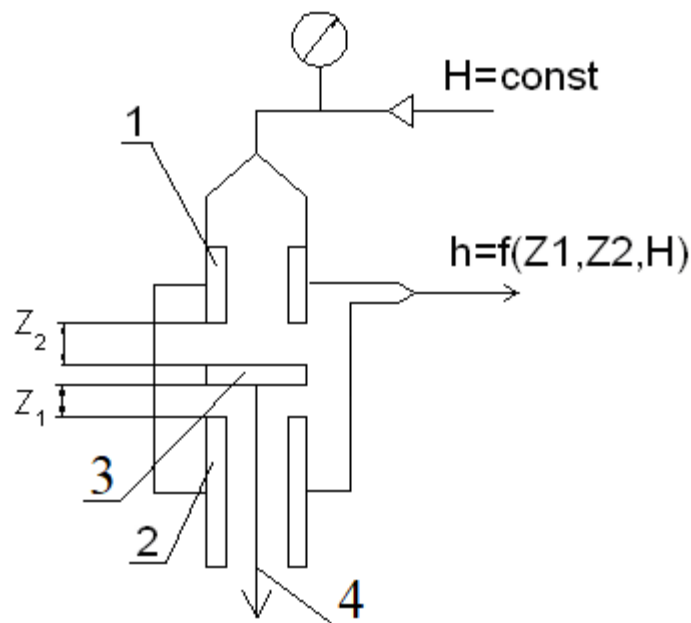


Рис.3 – Принципиальная схема контактной головки с регулируемым входным и измерительным соплами

При решении задач автоматизации контроля в машино-приборостроении возникает необходимость в создании измерительных устройств как с малым диапазоном измерения и высокой чувствительностью, например, для приборов активного контроля к универсальным станкам шлифовальной группы, так и устройств с широким диапазоном измерения и чувствительностью, удовлетворяющих требуемой точности измерения, например, для станков с программным управлением. Поэтому при моделировании статических характеристик пневматических головок рассматривались различные сочетания рабочего давления воздуха H и диаметра входного сопла d_1 (таблице 1) [5].

Таблица 1 – Исходные данные

№	Наименование параметра	Значения
1	Диаметр входного сопла, мм	0,5; 1,0; 1,5; 2,0
2	Диаметр измерительного сопла, мм	$\sqrt{5}$
3	Диаметр измерительного штока, мм	1,0
4	Рабочее давление воздуха, МПа	0,1; 0,15; 0,2

На **Рис.4,5** в качестве примера, показаны графики статических характеристик $h = f(Z)$ пневматической головки для рабочего давления воздуха $H=0,1$ МПа и диаметров входных сопел $d_1 = 0,5; 1,5$ мм.

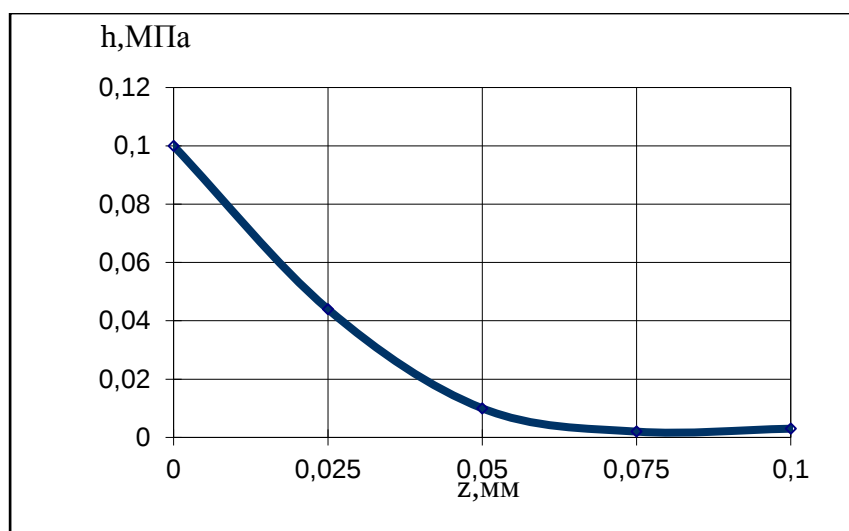


Рис.4 – График зависимости $h=f(Z)$ при $d_1 = 0,5$ мм, $H=0,1$ МПа

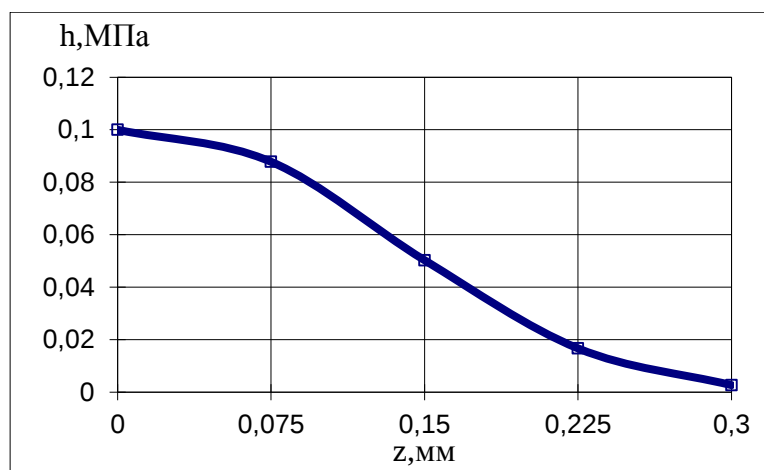


Рис.5 – График зависимости $h=f(Z)$ при $d_1 = 1,5$ мм, $H=0,1$ МПа

Анализ результатов расчета статических характеристик пневмосистемы при различных сочетаниях рабочих давлений H , диаметров

входных сопел d_1 позволяет определить зависимость прямолинейного участка Π_Z и чувствительности K_Z от параметров пневмосистемы.

В таблице 2 даны значения прямолинейных участков характеристик для всех исследуемых случаев. На **Рис.6** представлены графики зависимостей $\Pi_Z=f(d_1)$ для давлений $H = 0,1; 0,15; 0,2$ МПа.

Таблица 2 – Значения прямолинейных участков характеристики $\Pi_Z=f(d_1)$

Рабочее давление МПа	Диаметр входного сопла d_1 , мм			
	0,5	1,0	1,5	2,0
0,10	0,0263	0,055	0,15	0,19
0,15	0,015	0,06	0,151	0,195
0,20	0,025	0,06	0,15	0,20

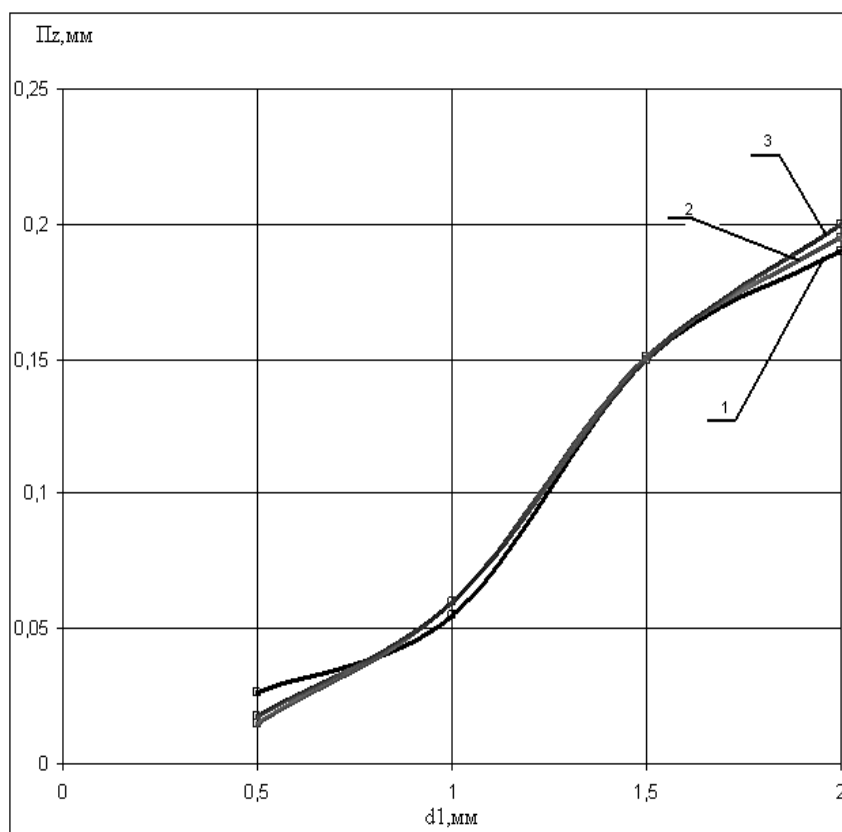


Рис.6 – Графики зависимостей $\Pi_Z=f(d_1)$
1 – $H=0,1$ МПа, 2 – $H=0,15$ МПа, 3 – $H=0,2$ МПа.

В таблице 3 приведены значения пневматических передаточных отношений K_Z , а на **Рис.5** – графики зависимостей $K_Z=f(d_1)$.

Таблица 3 – Пневматические передаточные отношения K_z , МПа/мм

Рабочее давление H , МПа	Диаметр входного сопла d_1 , мм			
	0,5	1,0	1,5	2,0
0,10	2,2	0,98	0,5	0,35
0,15	4,15	1,3	0,74	0,5
0,20	5,4	1,8	1,2	0,66

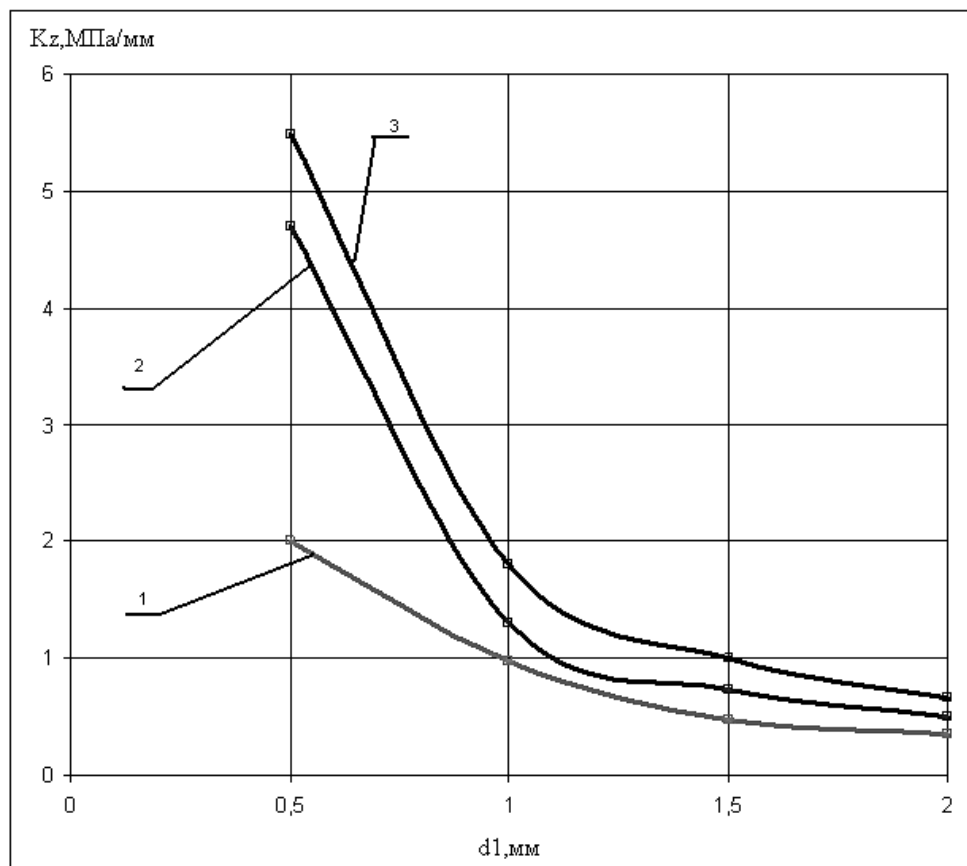


Рис.7 - Графики зависимостей $K_z=f(d_1)$,
1 – $H=0,1$ МПа, 2 – $H=0,15$ МПа, 3 – $H=0,2$ МПа

Выводы. 1. Рассмотрены конструктивные схемы пневматических контактных головок и предложена схема головки осевого действия с переменной площадью проходных сечений входного и измерительного сопел.

2. Приведены результаты моделирования статических характеристик и расчета прямолинейных участков и чувствительности исследуемой контактной головки для рабочих давлений воздуха $H=0,1$; $0,15$; $0,2$ МПа и диаметров входных сопел $d_1 = 0,5$; $1,0$; $1,5$; $2,0$ мм.

3. Значения прямолинейных участков характеристик лежат в пределах: $\Pi_z=0,015\dots0,15$ мм, пневматических передаточных отношений

(чувствительности) – $K_z = 0,35 \dots 5,4$ Мпа/мм, что в 2-4 раза выше чувствительности измерения обычного первичного пневматического преобразователя с переменным проходным сечением только измерительного сопла.

Библиографический список

1. Активный контроль в машиностроении: Справочник / Е.И. Педь. – М.: Машиностроение, 1978. – 352с.
2. Волосов С.С. Приборы для автоматического контроля в машиностроении / С.С. Волосов, Е.И. Педь. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 336 с.
3. Рабинович А.И. Пневматические устройства и системы в машиностроении / А.И. Рабинович. – К.: Техника, 1970. – 396с.
4. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. пособие / В.П. Легаев. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с.
5. Этингوف М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М.И. Этингوف. – М.: АПР, 2016. – 336 с.

Bibliograficheskij spisok

1. Aktivnyj kontrol' v mashinostroenii: Spravochnik / E.I. Ped'. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 352s.
2. Volosov S.S. Pribory dlya avtomaticheskogo kontrolya v mashinostroenii / S.S. Volosov, E.I. Ped'. – М.: Izd-vo standartov, 1975. – 336 s.
3. Rabinovich A.I. Pnevmaticheskie ustrojstva i sistemy v mashinostroenii / A.I. Rabinovich. – К.: Tekhnika, 1970. – 396s.
4. Legaev V.P. Pribory avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya v mashinostroenii: ucheb. posobie / V.P. Legaev. – Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009. – 123 s.
5. Etingof M.I. Avtomaticheskij razmernyj kontrol' na metallovezhushchih stankah / M.I. Etingof. – М.: APR, 2016. – 336 s.

¹Заморёнова Дарья Викторовна, к.т.н., доцент, zamik@ukr.net, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Васютенко Александр Павлович, к.т.н., доцент, vasutenko50@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

SIMULATION OF THE STATIC PERFORMANCE OF A PNEUMATIC PROBE HEAD

D.V. Zamoryonova, A.P. Vasyutenko

A diagram and a description of the principle of operation of a pneumatic contact head are presented, the purpose of the work is formulated - the determination of metrological characteristics based on modeling the dependence of the measuring air pressure on the gap between the nozzle and the flap for various combinations of initial parameters. The values of the straight-line sections of characteristics and sensitivity are determined, their dependences on the diameters of the inlet nozzle at various values of the working air pressure are given.

Keywords: pneumatic head, sensitivity, measuring range, simulation.

Zamoryonova Darya Viktorovna, candidate of technical science, docent, zamik@ukr.net, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

Vasyutenko Alexander Pavlovich, candidate of technical science, docent, vasutenko50@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University,

УДК 612.821: 621.37

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДОГРАММ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТЕСТОВЫХ СИГНАЛОВ ПРОТОТИПА ГАРНИТУРЫ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР

Филипович О.В.¹, Камцев В.А.²

Аннотация. Описывается применение методов электроэнцефалографии для построения интерфейсов мозг-компьютер. Приводится вариант конструкции корпуса обруча нейрогарнитуры. Для обработки тестового сигнала нейроинтерфейса используется метод модифицированных периодограмм. Приводятся результаты расчета и анализа спектральной плотности мощности сигнала.

Ключевые слова. Интерфейс мозг-компьютер, электроэнцефалография, спектральная плотность мощности, метод Уэлча, нейрогарнитура.

Нейроинтерфейс (интерфейс мозг-компьютер, ИМК; англ. brain-computer interface, BCI) является системой коммуникации человека с машиной, основанной на преобразовании регистрируемой активности мозга в управляющие команды [1 – 3].

Нейроинтерфейс как техническая система включает в себя средства снятия сигнала деятельности головного мозга, блок усиления и обработки полученной информации и целевой объект управления (**Рис.1**) [4].

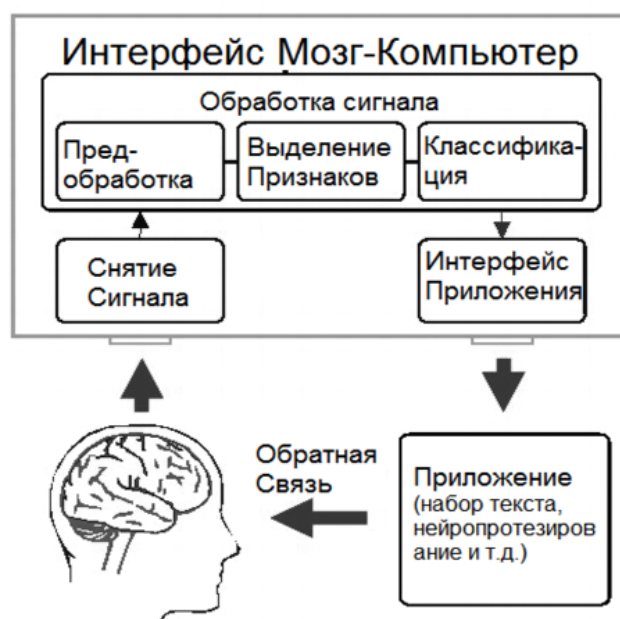


Рис.1 – Схема устройства ИМК

Выделяют следующие этапы обработки сигналов активности головного мозга [5]:

- 1) предобработка (фильтрация, удаление артефактов);
- 2) обработка (выделение с помощью различных математических алгоритмов наиболее важных характеристик сигнала, снижение количества информации);
- 3) трансляция (перевод отобранных характеристик в логические сигналы, классификация выбранных значений на основе различных методов статистического анализа);
- 4) постобработка (оценка совокупной эффективности ИМК, удаление наименее значимых параметров, увеличение быстродействия алгоритмов).

Одним из наиболее информативных способов исследования активности мозга является электроэнцефалография (ЭЭГ). Биоэлектрическая активность мозга регистрируется с поверхности головы человека или непосредственно коры головного мозга. Фиксируемые сигналы обладают всеми признаками случайного процесса, и, тем не менее, несут в себе информацию о работе множества функциональных систем организма, которые имеют локализацию своих управляющих звеньев в коре головного мозга. Подобные сигналы могут использоваться в процессе управления техническими объектами [6]. Системы ИМК на основе распознавания паттернов ЭЭГ-сигнала являются современным решением в сфере жизнеобеспечения и реабилитации людей с ограниченными двигательными способностями и параличами, связанными со спинально-мозговыми травмами, постинсультными состояниями и другими заболеваниями центральной и периферийной нервной системы, а также в сфере автоматизации производственных процессов при разработке систем поддержки принятия решений. Не менее актуальным применением служит задача управления различными мехатронными устройствами, такими как протезы или промышленные роботы-манипуляторы. Примерами экспериментальных образцов ИМК могут являться системы контроля умного дома, простые компьютерные игры, приложения для навигации в виртуальной реальности и простые устройства управления курсором [7].

Качество работы интерфейса мозг-компьютер, независимо от его специфики, напрямую зависит от качества снимаемых информативных сигналов, которое определяется, в том числе, конструкцией электродов. Среди них различают инвазивные и неинвазивные. Ввиду своей травмоопасности и сложности инвазивные датчики не получили широкого распространения. Неинвазивные, в свою очередь, также имеют ряд недостатков: низкая помехоустойчивость, малая площадь контакта, частые случаи отхождения контактов и спутывания проводов. Часть этих проблем возможно решить, разработав оптимальную конструкцию корпуса нейрогарнитуры, что позволило бы просто и доступно использовать все возможности интерфейса вне

лабораторий.

В 2019 году авторами была разработана конструкция корпуса обруча нейрогарнитуры (**Рис.2**), к которой предъявлялись следующие требования [8]:

- 1) обеспечение надёжного контакта электродов;
- 2) плотное прилегание к поверхности головы пользователя;
- 3) наличие блока, содержащего модуль предварительной обработки измерительной информации, аккумулятор и Bluetooth-модуль, для исключения проводной передачи информации блоку обработки сигналов;
- 4) безопасность использования;
- 5) эргономичность.

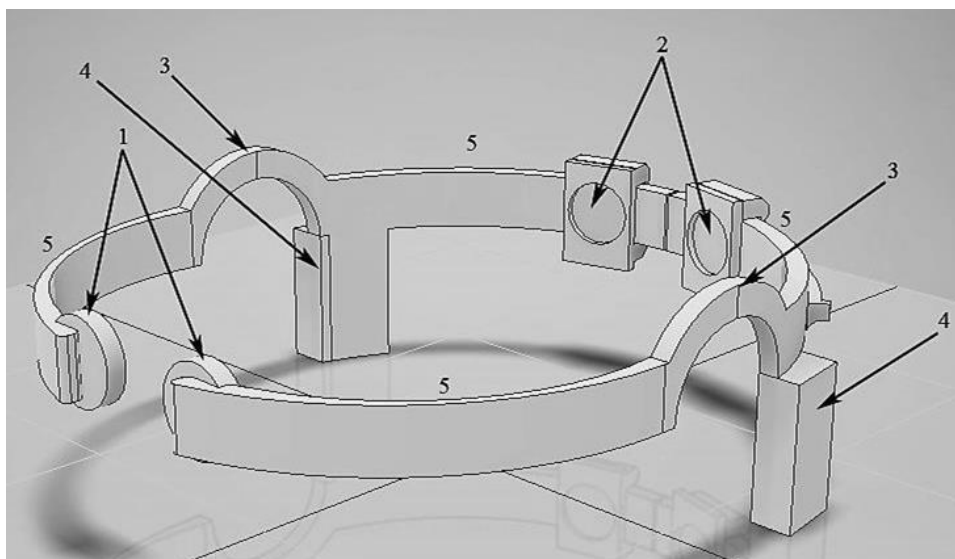


Рис.2 – Общий вид модели корпуса обруча нейрогарнитуры:

1 – электроды лобной доли; 2 – электроды затылочной доли; 3 – ушные выемки; 4 – секции модуля обработки измерительной информации, аккумулятора и Bluetooth-модуля; 5 – обруч

Для обеспечения плотного прилегания обруча и электродов к поверхности головы была предусмотрена возможность регулирования его размеров с разделением обруча на две половины при наличии ушных выемок. Для последующей реализации универсального нейроинтерфейса каркас рассчитан на 9 электродов: 4 встроены в обруч (лобные и затылочные отделы), 4 дополнительных (височные и теменные отделы) и один референтный (ушной). Внутри корпуса имеется полость отвода проводов электродов для питания от аккумулятора и передачи сигнала в Bluetooth-модуль.

Целью данной работы является реализация алгоритма обработки тестовых сигналов одного отведения прототипа ИМК для решения задачи выделения ритмов ЭЭГ. Суть поставленной задачи состоит в определении значений индексов активности ЭЭГ-ритмов. Обработка полученных сигналов производится в соответствии с алгоритмом, основанным на методе

модифицированных периодограмм (метод Уэлча) [9].

Алгоритм использования метода состоит в следующем.

1. Импортрование данных.

2. Разбиение последовательности данных $x(k)$ на сегменты $x_p(k)$, содержащие по N отсчётов и сдвинутые друг относительно друга на D отсчётов для взаимного перекрытия в 50% (**Рис.3**). Перекрытие сегментов обеспечивает увеличение числа усредняемых сегментов при заданной длине исходной записи и тем самым уменьшает дисперсию оценки энергетического спектра.

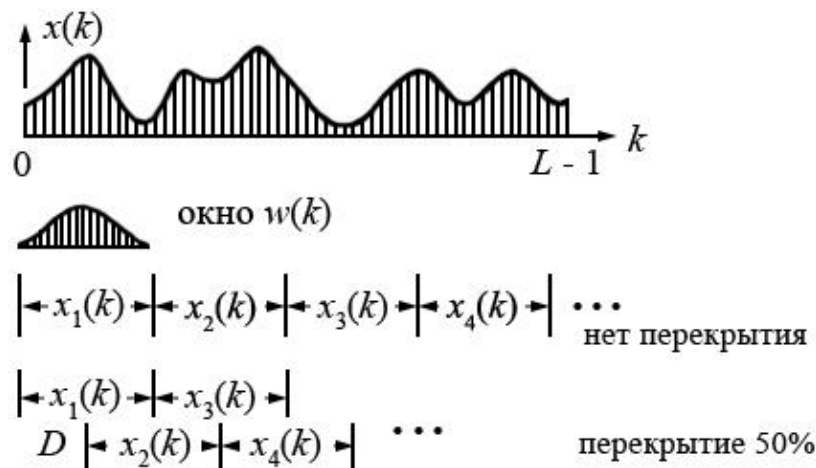


Рис.3 - Разбиение входной последовательности данных

3. Взвешивание каждого сегмента оконной функцией Хемминга $w_p(k)$, $k = 0, 1, \dots, N - 1$:

$$w(k) = \begin{cases} 0,54 - 0,46 \cos \frac{2\pi}{N} k, & -\frac{N}{2} \leq k \leq \frac{N}{2}, \\ 0 & \text{при других } k. \end{cases}$$

4. Вычисление дискретного преобразования Фурье (ДПФ) $X_p(n)$ для каждого взвешенного сегмента согласно следующему выражению:

$$X_p(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_p(k) w_p(k) e^{-jkn \frac{2\pi}{N}}$$

5. Расчёт периодограммы $\hat{G}_p(n\Delta f)$ для каждого сегмента на диапазонах частот ритмов для нахождения мощностей ритмов на каждом сегменте согласно следующему выражению:

$$\hat{G}_p(n\Delta f) = \frac{NT}{U} \times |X_p(n)|^2$$

где $n\Delta f = n/(NT)$ – частоты ДПФ; $U = \sum_{k=0}^{N-1} w^2(k)$ – энергия окна.

6. Расчёт средних мощностей каждого ритма P_α , P_β , P_θ и P_δ в соответствии

с выражением:

$$\hat{G}_w(n\Delta f) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \hat{G}_p(n\Delta f) = \frac{1}{PU} \sum_{p=0}^{P-1} |X_p(n)|^2.$$

7. Расчёт значений индексов активности ритмов:

$$I_x = \frac{P_x}{P_\alpha + P_\beta + P_\theta + P_\delta} \times 100\%,$$

где P_x – мощность ритма x , индекс активности I_x которого вычисляется.

В заключение была проведена проверка корректности алгоритма выделения ритмов ЭЭГ путём сравнения форм графиков спектральной плотности мощности (СПМ) тестового сигнала, построенных разрабатываемым приложением и эталонным программным обеспечением «Мицар ЭЭГ».

Для программной реализации алгоритма было использовано программное обеспечение MATLAB. Графический интерфейс приложения разработан с помощью интерактивной среды разработки MATLAB App Designer.

Частота дискретизации одноканального тестового сигнала составляет 250 Гц, общая длительность записи – 188 секунд. Также сигнал был предварительно нормирован и подвергнут фильтрации. Для построения графика спектральной плотности мощности тестового сигнала ЭЭГ были выбраны следующие параметры: тип окна - окно Хэмминга, величина перекрытия – 50%, длина окна – 4 секунды.

Результаты построения показаны на **Рис.4** и **Рис.5**.

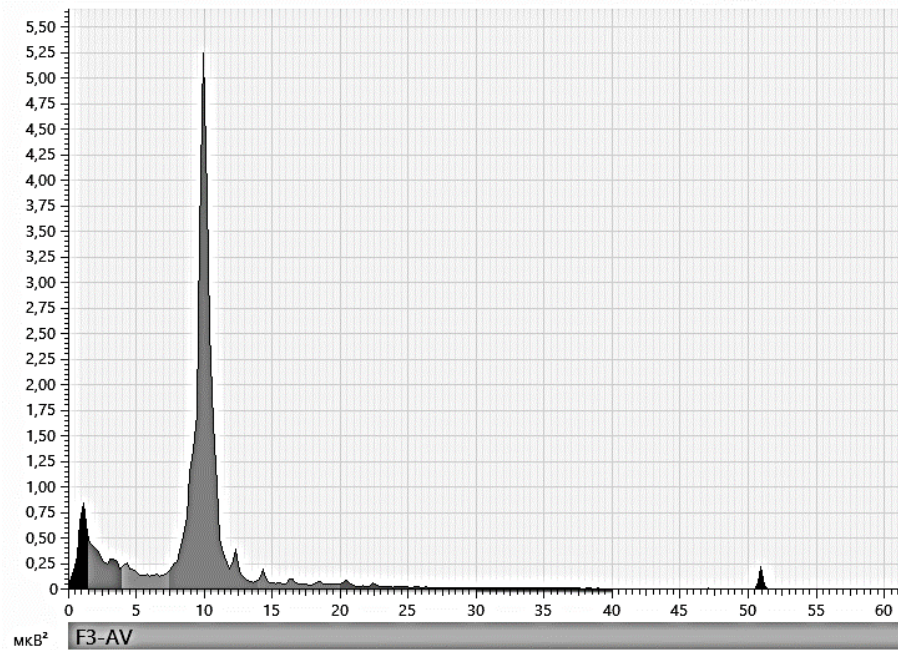


Рис.4 – Результат построения графика спектральной плотности мощности тестового сигнала ЭЭГ в программе Mitsar EEG

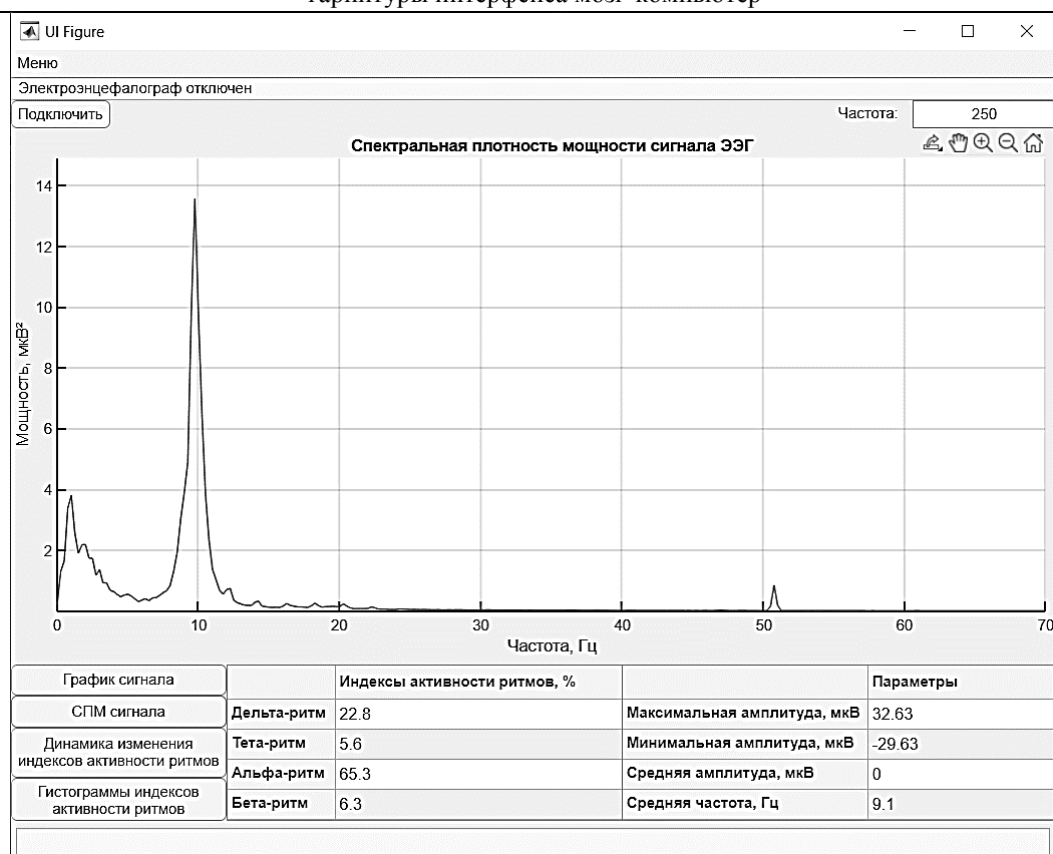


Рис.5 – Результат построения графика спектральной плотности мощности тестового сигнала ЭЭГ разработанной программой

Как видно из графиков СПМ, показанных на данных рисунках, формы кривых практически совпадают. Из этого следует, что и значения индексов активности ритмов ЭЭГ не будут отличаться, поскольку при их вычислении рассматривается лишь процентное соотношение ритмов, а не абсолютные значения мощностей.

Библиографический список

1. Wolpaw J. Brain-computer interfaces for communication and control / J. Wolpaw, N. Birbaumer, D. McFarland [et al.] // Clin. Neurophysiol., 2002.V. 113, P. 767– 791.
2. Rak R.R.J. Brain-computer interface as measurement and control system: the review paper / R.R.J. Rak, M. Kołodziej, A. Majkowski //Metrol. Meas. Syst. 2012. V. 19. P. 427–444.
3. Каплан А.Я. Экспериментально-теоретические основания и практические реализации технологии «Интерфейс мозг – компьютер» / А.Я. Каплан, А.Г. Кочетова, С.Л. Шишкин и др. //Бюллетень сибирской медицины. - Т12, №2, 2013. – С.21-29.
4. Маркин М.Е. Управление подвижными объектами при помощи интерфейса мозг-компьютер на примере роботизированного манипулятора / Автоматизация и измерения в машино- приборостроении: научный журнал, 2021

М.Е. Маркин, А.А. Дыда, Д.А. Оськин //Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.

5. A survey of signal processing algorithms in brain-computer interfaces based on electrical brain signals / Bashasha, A. [et al.] // J. Neural Eng. – 2007. – Vol. 4, № 2. – P. 32–57.

6. Томашвили А.В. Применение технологии регистрации вызванных потенциалов в разработке нейроинтерфейса / А.В. Томашвили // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – N 11. – С. 80-85.

7. Андреев А. М. Разработка прецизионного измерителя потенциалов ЭЭГ для комплекса нейроинтерфейса / А. М. Андреев, А. П. Гусев // Инженерный вестник. – 2014. – N 12. – С. 626-639.

8. Филипович О.В. Применение САПР при проектировании корпуса облуча нейрogarнитур / О.В. Филипович, Д.О. Кошечая, Н.Ю. Кадыков и др. // САПР и моделирование в современной электронике: тр. 3-й междунар. науч.-практ. конф., 24-25 окт. 2019 г., Россия, Брянск / М-во образования и науки РФ, Администрация Брянской обл. [и др.]. – Брянск, 2019. – С. 58-61.

9. Шахтарин Б.И. Методы спектрального оценивания случайных процессов /Б.И. Шахтарин, В.А. Ковригин. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Wolpaw J. Brain-computer interfaces for communication and control /J. Wolpaw, N. Birbaumer, D. McFarland [et al.] // Clin. Neurophysiol., 2002.V. 113, P. 767– 791.

2. Rak R.R.J. Brain-computer interface as measurement and control system: the review paper /R.R.J. Rak, M. Kołodziej, A. Majkowski //Metrol. Meas. Syst. 2012. V. 19. P. 427–444.

3. Kaplan A.YA. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovaniya i prakticheskie realizacii tekhnologii «Interfejs mozg – komp'yuter» /A.YA. Kaplan, A.G. Kochetova, S.L. SHishkin i dr. //Byulleten' sibirskoj mediciny. - T12, №2, 2013. – S.21-29.

4. Markin M.E. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami pri pomoshchi interfejsa mozg-komp'yuter na primere robotizirovannogo manipulyatora /М.Е. Маркин, А.А. Дыда, Д.А. Ос'кин //Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. – № 6.

5. A survey of signal processing algorithms in brain-computer interfaces based on electrical brain signals / Bashasha, A. [et al.] // J. Neural Eng. – 2007. – Vol. 4, № 2. – P. 32–57.

6. Tomashvili A. V. Primenenie tekhnologii registracii vyzvannyh potencialov v razrabotke nejrointerfejsa / A. V. Tomashvili // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2013. – N 11. – S. 80-85.

7. Andreev A. M. Razrabotka precizionnogo izmeritelya potencialov EEG dlya kompleksa nejrointerfejsa / A. M. Andreev, A. P. Gusev // Inzhenernyj vestnik. – 2014. – N 12. – S. 626-639.

8. Filipovich O.V. *Primenenie SAPR pri proektirovanii korpusa obrucha nejrogarnitury* / O.V. Filipovich, D.O. Koshevaya, N.YU. Kadykov i dr. // SAPR i modelirovanie v sovremennoj elektronike: tr. 3-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 24-25 okt. 2019 g., Rossiya, Bryansk / M-vo obrazovaniya i nauki RF, Administraciya Bryanskoj obl. [i dr.]. – Bryansk, 2019. – S. 58-61.

9. SHahtarin B.I. *Metody spektral'nogo ocenivaniya sluchajnyh processov* /B.I. SHahtarin, V.A. Kovrigin. – M.: Gelios ARV, 2005. – 248 s.

¹*Филипович Олег Викторович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», ophisl@yandex.ru, Россия, Севастопольский государственный университет*

²*Камцев Вячеслав Андреевич, магистрант, kva_m98@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

USING THE METHOD OF MODIFIED PERIDOGRAMS FOR PROCESSING TEST SIGNALS OF THE HEADSET PROTOTYPE OF THE BRAIN-COMPUTER INTERFACE

O.V. Filipovich, V.A. Kamtsev

The application of electroencephalographic methods for constructing brain-computer interfaces is described. A variant of the construction of the neuroheadset hoop case is presented. To process the test signal of the neurointerface, the method of modified periodograms is used. The results of calculation and analysis of the spectral power density of the signal are presented.

Keywords: brain-computer interface, electroencephalography, power spectral density, Welch method, neuroheadset.

Filipovich Oleg Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Instrument Systems and Automation Technological Processes, ophisl@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

Kamtsev Vyacheslav Andreevich, master student, kva_m98@mail.ru, Russia, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №4(16) 2021 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

05.02.00 Машиностроение и машиноведение

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

Телефон редакции: 8(692)550077

<https://www.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/3655-avtomatizatsiya-i-izmereniya-v-mashinopriborostroenii>

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Автоматизация и измерения в машино- приборостроении» обязательна.

Учредитель и издатель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33.
Севастополь, 299053.

№ рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 22.12.2021. Заказ 018К. Дата выхода в свет: 28.12.2021. Тираж: 50 экз.

Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 11.32.

Севастополь, 2021