

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№4(20)
2022

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, 2022

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

Балакин А.И., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Варганов М.В., д.т.н., проф.

(г. Москва)

Греков Н.А., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Доронина Ю.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Жмудь В.А., д.т.н., проф.,

(г. Новосибирск)

Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Моисеев Д.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

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)

Щенятский А.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Заморёнов М.В., к.т.н., доц

(г. Севастополь)

Майстришин М.М., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Рапацкий Ю.Л., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

- Козырев В.Г.** Синтез закона терминального управления останом электропривода методом SDRE 3
- Бохонский А.И., Рыжков А.И.** Динамические усилия в элементах подвеса при колебаниях маятника волновой энергоустановки 14
- Скитяев Д.И., Дробитько А.И., Лосев Д.В., Чаленков Н.И., Заморёнов И.М.** Исследование точности повторяемости по оси Z модуля на базе манипулятора типа SCARA 22

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Песчанский А.И.** Стационарные характеристики двухкомпонентной системы обслуживания с потерями и контролем качества обслуживания 30
- Поляков А.А., Моисеев Д.В., Машенко Е.Н.** Система поддержки принятия решения по управлению структурно-сложными организационно-техническими системами специального-назначения 39
- Сидоров С.М., Обжерин Ю.Е., Федоренко С.Н.** Полумарковская модель участка интеллектуальной распределительной сети 47
- Доронина Ю.В., Мустафаева М.И.** Информационная система поддержки транспортного обслуживания парково-рекреационных зон с применением беспилотных технологий 65
- Кротов К.В.** Иерархические модели оптимизации расписаний обработки партий в мелкосерийных производствах 78

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Изместьев И.Д., Щенятский А.В.** Датчики четырех осевого гироскопического блока и величина шума 100
- Осипов К.Н., Новиков В.В.** Распознавания неисправностей машиностроительных изделий 109

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.511.46

СИНТЕЗ ЗАКОНА ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСТАНОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТОДОМ SDRE

Козырев В.Г.

Аннотация. Построен закон терминального управления скоростью электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения с применением метода SDRE. Особенность задачи состоит в нелинейном характере динамики электропривода. Известные методы аналитического конструирования регуляторов в данном случае не пригодны. Применение метода SDRE позволило найти закон управления, работающий по принципу обратной связи и обеспечивающий равномерное и быстрое уменьшение скорости привода вплоть до его останова за заданное время.

Ключевые слова. Терминальное управление, метод SDRE, нелинейные системы, электропривод, последовательное возбуждение.

Введение. Производственные процессы, использующие оборудование, оснащенное электрическими двигателями, требуют периодического останова. Однако после отключения питающего напряжения от электродвигателей их роторы продолжают вращение по инерции и останавливаются только через определенный промежуток времени. Такой останов электродвигателя называется свободным выбегом.

Для электродвигателей, работающих с частыми пусками-остановами, останов способом свободного выбега не годится. С целью сокращения времени, необходимого для полного останова вращения ротора, применяется принудительное торможение. В случае электродвигателей постоянного тока принудительное торможение традиционно осуществляется противовключением и динамическим способом. Эти способы также не дают достаточно быстрого торможения, необходимого для многих исполнительных элементов систем автоматики.

За последние двадцать лет произошли качественные изменения в структуре электропривода, связанные в первую очередь с переходом на новую элементную базу построения как силового канала (IGBT-транзисторы, интеллектуальные силовые модули IPM), так и канала управления – высокопроизводительные микроконтроллерные системы прямого цифрового управления оборудованием. Указанные тенденции открыли широкие возможности управления электроприводами,

опирающиеся на современные теоретические методы оптимизации, позволяющие строить гибкие алгоритмы управления нелинейными объектами, реализуемые при помощи встраиваемых микроконтроллерных систем.

Предпочтительным является построение оптимального управления по принципу обратной связи ввиду возможности его использования в условиях отсутствия информации о возмущающих воздействиях. Однако многие методы оптимизации, такие, например, как метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), не применимы для решения данной задачи. Это связано с нелинейной природой динамики многих электроприводов, в частности, содержащих двигатели последовательного, параллельного и смешанного возбуждения. К числу перспективных и быстро развивающихся методов синтеза нелинейных систем управления относится метод SDRE, основные идеи которого сформулированы в работах [1-3]. Дальнейшее развитие он получил в работах [4-8].

В настоящей статье данный метод применяется для исследования электропривода (ЭП) постоянного тока с использованием последовательного возбуждения двигателя, динамика которого описывается нелинейными уравнениями. В статье построен закон терминального управления скоростью электропривода, осуществляющий плавный останов ЭП – быстрый перевод скорости вращения его выходного вала из произвольного текущего значения в нулевое. Выявлена также асимптотическая малость ошибки управления, что приближает данный закон управления по этому параметру к классическому терминальному линейно-квадратичному регулятору, строящемуся методом АКОР [9].

Электромеханическое уравнение электропривода. Рассматриваемый электропривод содержит в своем составе электродвигатель постоянного тока (ДПТ), редуктор и тахогенератор. В ДПТ с последовательным возбуждением обмотка возбуждения и якорная обмотка соединены последовательно, как показано на **Рис.1**.

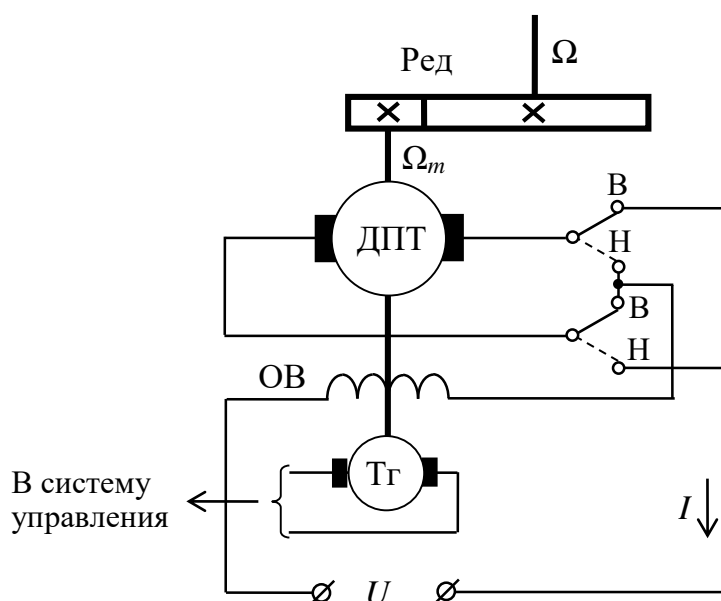


Рис.1 – Схема электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Направление магнитного момента: В – вперед, Н – назад

Электромеханическое уравнение ЭП имеет вид

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{C_{fr}}{J}\Omega \pm \frac{c_m k_e k_r}{J(R_a + R_e + c_m k_e k_r \Omega)^2} U^2 - \frac{1}{J} M_{load},$$

или, в терминах переменной состояния $x = \Omega$ (скорости вращения выходного вала ЭП) и управления $u = U^2$ (квадрата электрического напряжения на обмотках),

$$\frac{dx}{dt} = a(x)x + b(x)u + c, \quad (1)$$

где $a(x)$ и $b(x)$ – переменные коэффициенты-функции состояния x :

$$a(x) = -C_{fr}(x) / J = a_0 + a_1 \cdot x, \quad a_0 = C_{fr0} / J, \quad a_1 = C_{fr1} / J,$$

$$b(x) = \pm \frac{c_m k_e k_r}{J(R_a + R_e + c_m k_e k_r x)^2} = \pm \frac{b_1}{(b_2 + b_3 x)^2}, \quad b_1 = c_m k_e k_r / J, \quad b_2 = R_a + R_e,$$

$b_3 = c_m k_e k_r$; $c = -M_{load} / J$; верхний знак («+») соответствует прямому вращению (вращающий магнитный момент положительный), нижний («-») – обратному (момент отрицательный). Для реверса концы обмотки якоря, соединенные с обмоткой возбуждения, перебрасываются на противоположные клеммы (Рис.1).

В этих выражениях физические параметры имеют следующий смысл: U – электрическое напряжение, приложенное к цепи обмоток ДПТ; I – электрический ток в цепи обмоток; R_a и L_a – активное сопротивление и

индуктивность якорной обмотки; R_e и L_e – активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения; k_r – коэффициент передачи редуктора; $\Omega = \Omega_m / k_r$ и Ω_m – угловые скорости вращения выходного вала ЭП и вала двигателя; J – приведенный момент инерции вала ЭП; $c_m = c_e$ – коэффициенты момента и эдс; k_e – коэффициент магнитного потока возбуждения; C_{fr0} и C_{fr1} – коэффициенты вязкого трения; M_{load} – механический момент нагрузки на валу ЭП.

Постановка задачи. С помощью метода SDRE необходимо построить закон управления скоростью вращения выходного вала электропривода Ω по принципу обратной связи, обеспечивающий останов ЭП в течение заданного времени. В терминах объекта (1) это означает найти закон терминального управления состоянием x вида $u = -m \cdot x$, переводящий объект из произвольного начального состояния $x(t_0) = x^0$ в нулевое $x(t_f) = x^f = 0$ или в его малую окрестность $x(t_f) = x^f \approx 0$ за конечное заданное время $t_0 \leq t \leq t_f$.

Метод решения. Объект управления, рассматриваемый в настоящей работе, содержит аддитивно входящее управляющее воздействие и коэффициенты, зависящие от состояния, и представлен нелинейным скалярным уравнением (1). В подобных условиях обычно удастся применить SDRE-метод, эффективность которого подтверждается многими исследованиями [1-8].

Для решения задачи этим методом введем функционал качества

$$I[u(\cdot)] = \frac{1}{\lambda_f} f \cdot x^2(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [q(x)x^2(t) + r(x)u^2(t)]dt, \quad (2)$$

где $\lambda_f > 0$ – малый параметр; f – постоянный коэффициент; $q(x)$ и $r(x)$ – коэффициенты-функции состояния x . Большое значение штрафного коэффициента f / λ_f в терминальной части функционала (2) способствует уменьшению терминальной ошибки управления $x(t_f)$. Стремясь сократить штраф, регулятор будет пытаться подавить эту ошибку, что отвечает поставленной задаче доведения ее до нуля. Коэффициенты $q(x)$ и $r(x)$ в интегральной части функционала (2) влияют дополнительно на качество переходного процесса в целом, способствуя ограничению интегральной ошибки и управляющего воздействия на всем отрезке времени $t_0 \leq t \leq t_f$.

Построение управления. Следуя методу SDRE [2] запишем вид закона управления исходя из условия минимизации функционала (2), проводимой при «замораживании» зависящих от состояния коэффициентов:

$$u(x, t) = -r^{-1}(x)b(x)k(x, t)x. \quad (3)$$

Здесь скалярная функция $k(x, t)$ есть решение дифференциального уравнения Риккати

$$\dot{k}(x, t) \equiv \frac{\partial k(x, t)}{\partial t} = -2a(x)k(x, t) + s(x)k^2(x, t) - q(x), \quad (4)$$

с конечным условием

$$k(x, t_f) = f / \lambda_f,$$

при этом

$$s(x) = b^2(x)r^{-1}(x) > 0.$$

В уравнении (4) переменная x принимается постоянной («замораживается»), т.е. рассматривается как параметр. Поэтому производная по t частная.

Согласно [2] функция $k(x, t)$ определяется из последовательности уравнений:

алгебраическое уравнение Риккати

$$-2a(x)k_s(x) + s(x)k_s^2(x) - q(x) = 0,$$

для которого берется положительный корень

$$k_s(x) = \frac{a(x) + \sqrt{a^2(x) + s(x)q(x)}}{s(x)} > 0;$$

алгебраическое уравнение Ляпунова

$$2a_c(x)p_s(x) - s(x) = 0,$$

где $a_c(x) = a(x) - s(x)p_s(x) = -\sqrt{a^2(x) + s(x)q(x)} < 0$, для которого берем отрицательный корень

$$p_s(x) = \frac{s(x)}{2a_c(x)} < 0;$$

дифференциальное уравнение Ляпунова

$$\dot{p}(x, t) \equiv \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = 2a_c(x)p(x, t) - s(x)$$

с решением

$$p(x, t) = [p^f - p_s(x)]e^{2a_c(t-t_f)} + p_s(x),$$

где

$$p^f = p^f(x, \lambda_f) = p(x, t_f, \lambda_f) = \frac{\lambda_f}{f - \lambda_f k_s(x)}.$$

Тогда решение исходного дифференциального уравнения Риккати (4) есть

$$k(x, t) = p^{-1}(x, t) + k_s(x). \quad (5)$$

В силу положительности p^f при малых λ_f

$$p(x, t) = [p^f - p_s(x)]e^{2a_c(t-t_f)} + p_s(x) = -p_s(x)[e^{2a_c(t-t_f)} - 1] + p^f e^{2a_c(t-t_f)} > 0.$$

Значит, $p^{-1}(x, t) > 0$ существует при всех x, t и малых λ_f .

SDRE-управляемая траектория. Объединяя полученные результаты, можно записать модель системы терминального управления с обратной связью в виде уравнений (1) и (3). Она описывает изменение скорости вращения вала электропривода $x = \Omega$ под действием управления $u = U^2$, формируемого в зависимости от скорости x и времени t . С учетом соотношения $u = U^2$ управляющее напряжение на обмотке подчиняется выражению

$$U = \sqrt{u} = g(x, t) \cdot \sqrt{x},$$

где $g(x, t) = \sqrt{r^{-1}(x)b(x)k(x, t)}$ – коэффициент усиления цепи обратной связи по напряжению U .

Моделирование. Произведем расчет останова выходного вала ЭП с электродвигателем типа 2ПФ132ЛГУХЛ4. Параметры электродвигателя и редуктора: номинальные мощность и напряжение двигателя $P_{\text{ном}} = 2.8$ кВт и $U_{\text{ном}} = 110$ В, номинальная и максимальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 750$ об/мин и $n_{\text{max}} = 3750$ об/мин ($\Omega_{m_nom} = n_{\text{ном}} 2\pi / 60 = 78.54$ рад/с, $\Omega_{m_max} = n_{\text{max}} 2\pi / 60 = 392.7$ рад/с), $R_a = 0.269$ Ом, $L_a = 5.7 \cdot 10^{-3}$ Гн, $R_e = 25$ Ом, $L_e = 6.339$ Гн, $k_r = 100$, $J_m = 0.048$ кг·м², $J_r = 0.0096$ кг·м², $c_m = 181$ В·с/рад.

Останов вала ЭП соответствует наложению на уравнение (1) граничных условий

$$\Omega(t_0) = \Omega_0, \quad \Omega(t_f) = \Omega_f = 0. \quad (6)$$

Возьмем для определенности $\Omega_0 = 1$ рад/с. При этом скорость вращения вала двигателя будет $\Omega_{m0} = 100$ рад/с или, в оборотах в минуту, $n_{\text{ном}0} = 955$ об/мин.

Веса интегрального функционала (2) примем равными: $f = 1$, $q = 1$, $r = 5 \cdot 10^{-5}$, при этом λ_f подыскивается достаточно малым для достижения терминального условия (6).

Численно интегрируя дифференциальное уравнение (1) при управляющем воздействии (3) и заданном начальном условии (6), найдем процесс управления ЭП. Результаты расчетов для случая времени управления $t_f - t_0 = 5$ секунд представлены на Рис.2-4. Рассмотрен вариант отсутствия вязкого трения на валу как наиболее энергоемкий для осуществления торможения.

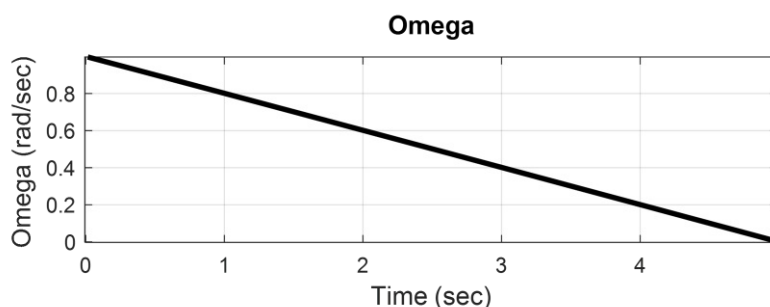


Рис.2 – Угловая скорость Ω выходного вала ЭП в процессе останова

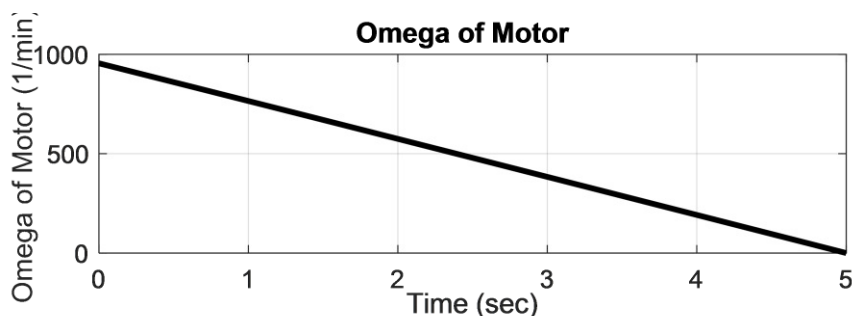


Рис.3 – Угловая скорость Ω_m вала двигателя в процессе останова

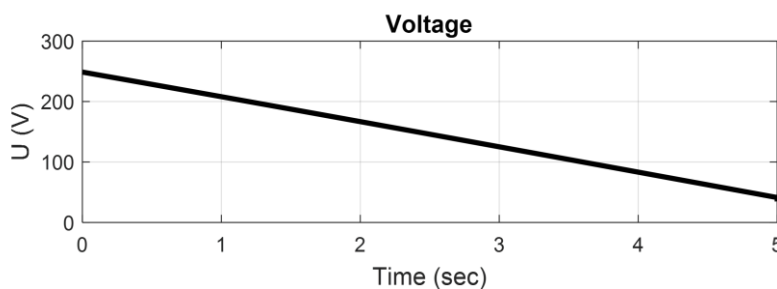


Рис.4 – Электрическое напряжение двигателя U в процессе останова

Из графика изменения угловой скорости выходного вала ЭП во времени на **Рис.2** понятно, что поставленная задача выполнена. При помощи найденного управления осуществляется плавный останов вала за требуемое время 5 сек при начальной скорости вала ЭП $\Omega_0 = 1$ рад/с (или скорости вала электродвигателя 955 об/мин). Управляющее напряжение U на обмотках электродвигателя изменяется в допустимых технических пределах, что видно из графика на **Рис.4**.

Представленный на **Рис.5** коэффициент усиления обратной связи g в функции времени изменяется в приемлемых границах, возрастая, что вообще присуще терминальным системам, к концу процесса управления.

Качество управления во всех случаях отвечает нормативным инженерным требованиям. При уменьшении малого параметра в коэффициенте штрафа терминальная ошибка управления стремится к нулю.

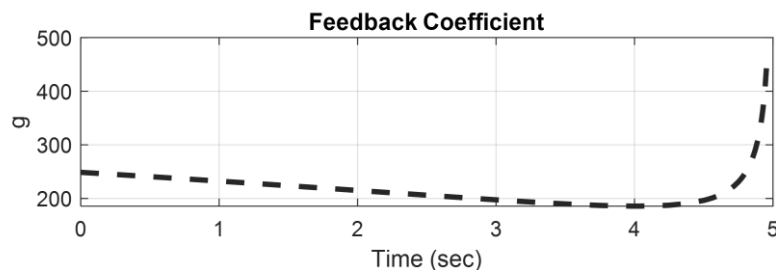


Рис.5 – Коэффициент усиления обратной связи g в функции времени

Для сравнения на нижеследующем рисунке показаны процессы изменения скорости выходного вала Ω и управляющего напряжения U при полном времени управления $t_f - t_0 = 2$ секунды. Из расчета можно заключить, что останов и в этом случае осуществляется успешно, однако для этого требуется более интенсивное управляющее напряжение, достигающее в максимуме практически до 400 вольт. Электрическая изоляция обмотки способна выдерживать подобное напряжение лишь при разовых, например аварийных, остановах.

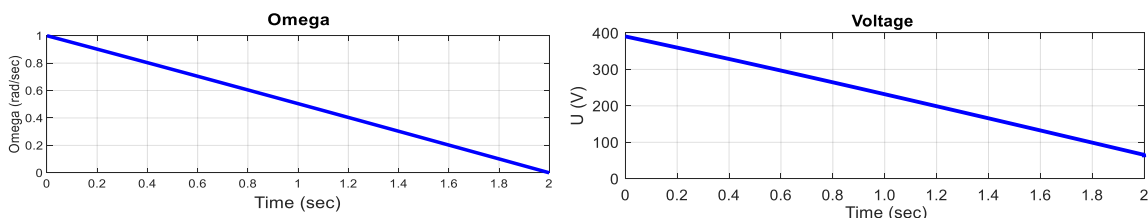


Рис.6 – Угловая скорость Ω и напряжение U в процессе останова

Заключение. Построен закон терминального управления электроприводом с двигателем постоянного тока последовательного

возбуждения. Изменение скорости вращения вала электропривода описывается нелинейным скалярным уравнением с коэффициентами, зависящими от переменной состояния. Для решения задачи применен метод синтеза, основанный на SDRE-подходе. Полученный с его помощью закон управления обеспечивает останов электропривода в течение заданного времени при благоприятном ходе переходного процесса останова. Форма обратной связи закона способствует преодолению возмущающего эффекта от возможных неконтролируемых нагрузок на валу.

Одновременно показано, что с увеличением коэффициента штрафа на терминальную ошибку в функционале качества значение ошибки стремится к нулю.

Проведенное исследование свидетельствует о достаточной эффективности метода SDRE при синтезе замкнутого регулятора нелинейного объекта, представленного электроприводом с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения.

Техническая реализация закона управления в цифровой форме может быть осуществлена путем использования простого встроенного микроконтроллера и не вызывает особых затруднений.

Библиографический список

1. Cimen T. State-dependent Riccati equation (SDRE) control: a survey / T. Cimen // Proceedings of the 17th IFAC World Congress. – 2008. – pp. 3761-3775.
2. Khamis A. Nonlinear Optimal Tracking Using Finite-Horizon State Dependent Riccati Equation (SDRE) / A. Khamis, D.S. Naidu // Recent Advances in Electrical Engineering. 4th International Conference on Circuits, Systems, Control, Signals (CSCS '13). – 2013. – pp. 37-42.
3. Mracek C.P. SDRE Autopilot for Dual Controlled Missiles / C.P. Mracek // Proc. 17'IFAC Symposium. Automat. Control Aerospace. – 2007.
4. Афанасьев В.Н. Управление нелинейными объектами с параметрами, зависящими от состояния / В.Н. Афанасьев // Автоматика и телемеханика. – 2011. – Вып.4. – С. 43-56.
5. Дмитриев М.Г. Гладкий нелинейный регулятор в слабо нелинейной системе управления с коэффициентами, зависящими от состояния / М.Г. Дмитриев // Труды ИСА РАН – 2014. – Том 64. 4/2014. – с.53-58.
6. Heydary Ali Closed-form solution to finite-horizon suboptimal control of nonlinear systems / Ali Heydary, S.N. Balakrishnan // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2015. – Vol.25. – pp.2687-2704.
7. Danik Yu.E. Numerical-Analytical Algorithms for Nonlinear Optimal Control Problems on a Large Time Interval / Yu.E. Danik, M.G. Dmitriev,

- D.A. Makarov, T.A. Zarodnyuk // Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. – 2018. – Vol. 248. – P. 113–124.
8. Dmitriev M.G. The stabilizing composite control in a weakly nonlinear singularly perturbed control system / M.G. Dmitriev, D.A. Makarov // 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC 2017). – 2017. – pp. 594–599.
9. Козырев В.Г. Терминальная ошибка почти точного оптимального приведения в ноль / В.Г. Козырев // Динамические системы: Межвед. 2001. – Вып.17. – С. 18–22.

Bibliograficheskiy spisok

1. Cimen T. State-dependent Riccati equation (SDRE) control: a survey / T. Cimen // Proceedings of the 17th IFAC World Congress. – 2008. – pp. 3761-3775.
2. Khamis A. Nonlinear Optimal Tracking Using Finite-Horizon State Dependent Riccati Equation (SDRE) / A. Khamis, D.S. Naidu // Recent Advances in Electrical Engineering. 4th International Conference on Circuits, Systems, Control, Signals (CSCS '13). – 2013. – pp. 37-42.
3. Mracek C.P. SDRE Autopilot for Dual Controlled Missiles / C.P. Mracek // Proc. 17th IFAC Symposium. Automat. Control Aerospace. – 2007.
4. Afanas'ev V.N. Upravlenie nelinejnymi ob'ektami s parametrami, zavisyashchimi ot sostoyaniya / V.N. Afanas'ev // Avtomatika i telemekhanika. – 2011. – Vyp.4. – S. 43-56.
5. Dmitriev M.G. Gladkij nelinejnyj reguljator v slabo nelinejnoj sisteme upravleniya s koefficientami, zavisyashchimi ot sostoyaniya / M.G. Dmitriev // Trudy ISA RAN – 2014. – Tom 64. 4/2014. – s.53-58.
6. Heydary Ali Closed-form solution to finite-horizon suboptimal control of nonlinear systems / Ali Heydary, S.N. Balakrishnan // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2015. – Vol.25. – pp.2687-2704.
7. Danik Yu.E. Numerical-Analytical Algorithms for Nonlinear Optimal Control Problems on a Large Time Interval / Yu.E. Danik, M.G. Dmitriev, D.A. Makarov, T.A. Zarodnyuk // Springer Proceedings in Mathematics & Statistics – 2018. – Vol. 248. – P. 113–124.
8. Dmitriev M.G. The stabilizing composite control in a weakly nonlinear singularly perturbed control system / M.G. Dmitriev, D.A. Makarov // 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC 2017). – 2017. – pp. 594–599.
9. Kozyrev V.G. Terminal'naya oshibka pochni tochnogo optimal'nogo privedeniya v nol' / V.G. Kozyrev // Dinamicheskie sistemy: Mezhhved. 2001. – Vyp.17. – S. 18–22.

Козырев Владимир Георгиевич, к.т.н., доцент, vldr.kzrv@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

**SYNTHESIS OF THE LAW OF TERMINAL CONTROL OF ELECTRIC
DRIVE STOP BY THE SDRE METHOD**

V.G. Kozyrev

The law of terminal speed control of an electric drive with a DC motor of sequential excitation is constructed by applying the SDRE method. The peculiarity of the problem is the nonlinear nature of the dynamics of the electric drive. The known methods of analytical design of regulators are not suitable in this case. The application of the SDRE method made it possible to find a terminal control mechanism that works on the feedback principle and ensures a uniform and rapid reduction in the speed of the drive up to its stop in a given time.

Key words: terminal control, SDRE method, nonlinear systems, electric drive, sequential excitation.

Kozyrev Vladimir Georgievich, candidate of technical sciences, docent, vldr.kzrv@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ПОДВЕСА ПРИ КОЛЕБАНИЯХ МАЯТНИКА ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

Бохонский А.И.¹, Рыжков А.И.²

Аннотация. *С использованием упрощенной динамической модели волновой энергоустановки исследованы колебания внутренних продольных усилий в несущих стержнях подвеса маятника при горизонтальных волновых воздействиях. Значения периодических динамических усилий позволяют оценить прочность стоек с позиций усталости материала.*

Ключевые слова: *волновая энергоустановка, колебания маятника, конструкция подвеса, динамические внутренние усилия.*

Введение. Теория колебаний широко развита в классических работах. Колебаниям линейных и нелинейных систем посвящена, например, литература [1-12]. Сложный характер колебаний физически и геометрически нелинейных систем обычно предполагает учет свободных и вынужденных колебаний, параметрических и автоколебаний, а также учет случайных воздействий. Исследованию нелинейных колебаний механических систем при детерминированных и случайных воздействиях посвящены работы [10,19] и другие. Фазовые диаграммы позволяют выявить особые точки устойчивого и неустойчивого динамического равновесия систем.

Исследованию оптимальных управлений колебаниями объектов посвящены работы [1-17].

В.В. Чебоксаровым предложена оригинальная маятниковая волновая энергоустановка [18], предполагающая использование резонанса в нелинейной системе. Упрощенная динамическая модель волновой энергоустановки приведена в [19]. Маятник – рабочее звено энергоустановки, в первом приближении его можно рассматривать как систему с одной степенью свободы при сложных (детерминированных и случайных) горизонтальных и вертикальных возмущениях моря.

В нелинейной системе не исключается также появление субгармонических колебаний. В случае вертикального воздействия возможен параметрический резонанс с потерей динамической устойчивости. Достижение устойчивого движения актуально для обеспечения стабильной работы энергоустановки.

Цель исследований – оценка внутренних динамических усилий в элементах стержневой конструкции при колебаниях маятника как механического исполнительного органа волновой энергоустановки.

Динамика маятника на примере маятниковой волновой энергоустановки В.В. Чебоксарова [18] отражает циклическое нагружение стоек рамной стержневой конструкции подвеса маятника (Рис.1).

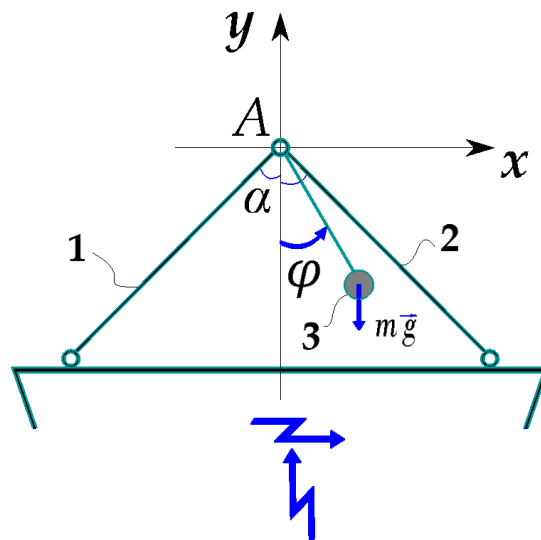


Рис.1 – Упрощенная схема энергоустановки: 1, 2 – упругие стержни подвеса; 3 – маятник.

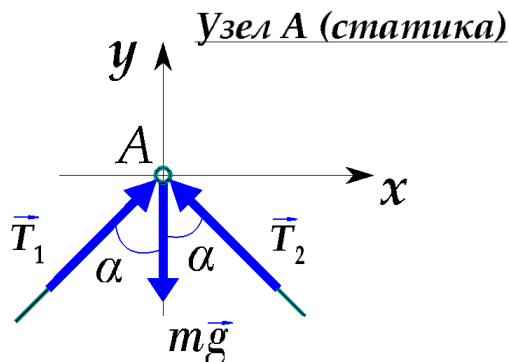


Рис.2 – Статическое равновесие узла А.

Использованы допущения: несущие стержни, соединенные основанием и шарнирно прикрепленные к нему, работают только на растяжение–сжатие; распространение волн не учитывается; угловые перемещения маятника предполагаются малыми ($\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$).

Предложенный В.В. Чебоксаровым преобразователь волновой энергии с крупногабаритным секторным маятником для его практической реализации предполагает создание сложной динамической модели с

достаточно полным заданием динамического воздействия при учете детерминированных и случайных составляющих. Однако, некоторые характерные особенности динамики объекта могут быть выявлены на его простой модели.

1. Уравнение колебаний маятника.

Вынужденные колебания при боковой качке плавучей установки предполагаются в виде $x_e = a \cdot \sin(pt)$, где $a, p = \text{const}$. Дифференциальное уравнение колебаний маятника в этом случае принимает вид:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + k^2\varphi = \frac{a \cdot p^2}{L} \cdot \sin(pt). \quad (1)$$

Общее решение уравнения (1) при нулевых начальных условиях ($\varphi(0)=0$, $\dot{\varphi}(0)=0$):

$$\varphi(t) = \frac{a \cdot p^2}{L(k^2 - p^2)} \left(\sin(pt) - \frac{p}{k} \sin(kt) \right). \quad (2)$$

Угловая скорость маятника

$$\omega(t) = \dot{\varphi}(t) = \frac{a \cdot p^3}{L(k^2 - p^2)} (\cos(pt) - \cos(kt)). \quad (3)$$

2. Определение статических и динамических усилий (Рис.1,2).

Усилия в стержнях подвеса математического маятника определяются в предположении, что стержни по концам закреплены шарнирно и работают на сжатие. Нагружение силой $G = mg$, приложенной по оси симметрии, описывается условиями равновесия плоской системы сходящихся сил:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n P_{kx} &= 0; \quad T_1 \sin\alpha - T_2 \sin\alpha = 0; \\ \sum_{k=1}^n P_{ky} &= 0; \quad T_1 \cos\alpha + T_2 \cos\alpha - G = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) следует: $T_1 = T_2 = T = \frac{G}{2 \cos\alpha}$.

Динамическое нагружение осуществляется силой $G = mg$ и $m\dot{\varphi}^2 \cdot l \cdot \cos\varphi$. Условия динамического равновесия принимают вид:

$$\begin{aligned} T_1 \sin \alpha - T_2 \sin \alpha + m\omega^2 L \sin \varphi &= 0; \\ T_1 \cos \alpha + T_2 \cos \alpha - mg - m\omega^2 L \cos \varphi &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение системы (5):

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{m(\omega^2 L (\cos \varphi \cdot \sin \alpha - \sin \varphi \cdot \cos \alpha) + g \sin \alpha)}{\sin 2\alpha}; \\ T_2 &= \frac{m(\omega^2 L (\sin \varphi \cdot \cos \alpha + \cos \varphi \cdot \sin \alpha) + g \sin \alpha)}{\sin 2\alpha}. \end{aligned} \quad (6)$$

Исходные данные: $\alpha = \frac{\pi}{4}$; $m = 50 \text{ кг}$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $L = 1 \text{ м}$;
 $k = \sqrt{g/L}$; $p = 0,5 \cdot k$; $a = 2 \text{ м}$; $E = 2\pi/k$.

Получено: $k = 3,13 \text{ с}^{-1}$; $p = 1,57 \text{ с}^{-1}$; $G = mg = 490 \text{ Н}$.

Графики $\varphi(t)$ и $\dot{\varphi}(t)$ изображены на **Рис.3**. За 4 секунды осуществляется одно полное колебание маятника. На **Рис.4** показаны колебания продольных усилий $T_1(t)$ и $T_2(t)$ в элементах конструкции.

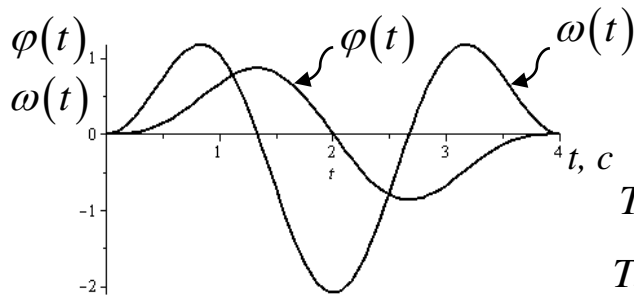


Рис.3 – Графики $\varphi(t)$ и $\omega(t)$.

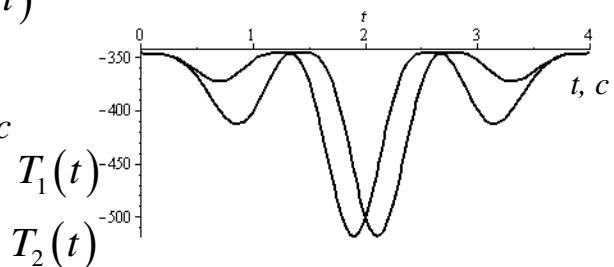


Рис.4 – Графики $T_1(t)$ и $T_2(t)$.

Максимальное статическое сжимающее усилие в одном стержне $T_c = 346,8 \text{ Н}$, а динамическое $T_d = 520 \text{ Н}$. Динамический коэффициент равен $\frac{T_d}{T_c} \cong 1,5$. При этом максимальное отклонение маятника $\varphi_{\max} = 0,857$ или $\varphi_{\max} = 49,13^\circ$.

Заключение.

Найденные внутренние динамические усилия в элементах подвеса маятника при сочетании детерминированных и случайных волновых воздействий позволяют выявить реальные резервы несущей способности

конструкции с учётом пределов выносливости материалов при повторно-переменных напряжениях.

Наиболее общий алгоритм расчета на усталостную прочность опасных сечений конструкции подвеса маятника при переменных напряжениях включает вычисление эффективных коэффициентов концентрации по нормальным и касательным напряжениям и определении общего запаса усталостной прочности (по нормальным и касательным напряжениям). Прочность конструкции будет обеспечена, если вычисленный запас усталостной прочности больше нормативного.

Библиографический список

1. Андропов А.А. Теория колебаний / А.А. Андропов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Физматгиз, 1950. – 916 с.
2. Бутенин Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний / Н.В. Бутенин, Ю.И. Неймарк, П.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1976. – 256 с.
3. Боголюбов И.К. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / И.К. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – Изд. 2-е. – М.: Физматгиз, 1958. – 408 с.
4. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Гостехиздат, 1958. – 628 с.
5. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем / В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
7. Бидерман В.П. Прикладная теория механических колебаний / В.П. Бидерман. – М.: Высш. школа, 1972. – 414 с.
8. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. Т.1. Колебания линейных систем / Под. ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
9. Вибрации в технике. Справочник В 6-ти томах. Т.2. Колебание нелинейных механических систем. – М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.
10. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем / В.В. Болотин. – М.: Гостехиздат, 1956. – 600 с.
11. Светлицкий В.А. Сборник задач по теории колебаний / В.А. Светлицкий, И.В. Стаценко. – М.: Высш. школа, 1973. – 454 с.
12. Мещерский И.В. Задачи по теоретической механике: Учебное пособие для вузов / И.В. Мещерский. – 38-е изд. – СПб.: Лань, 2010. – 448 с.
13. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения

-
- / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.Н. Мозолевский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.
14. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.
15. Бохонский, А.И. Реверсионный принцип оптимальности. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016.–174с.
16. Бохонский, А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Издательство: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
17. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов: учебное пособие / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 170 с.
18. Чебоксаров В.В. Сравнительный анализ эффективности двух схем маятниковых преобразователей энергии волн / В.В. Чебоксаров // Энергетические установки и технологии. – 2016. Т2. №1. – С. 68 – 75.
19. Бохонский А.И. Упрощённая динамическая модель волновой энергоустановки / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, В.В. Чебоксаров // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2022. – Вып. №1 (17). – С. 20 – 24.

Bibliograficheskiy spisok

1. Andropov A.A. Teoriya kolebanij / A.A. Andropov, A.A. Vitt, S.E. Hajkin. – М.: Fizmatgiz, 1950. – 916 s.
2. Butenin N.V. Vvedenie v teoriyu nelinejnyh kolebanij / N.V. Butenin, YU.I. Nejmark, P.A. Fufaev. – М.: Nauka, 1976. – 256 s.
3. Bogolyubov I.K. Asimptoticheskie metody v teorii nelinejnyh kolebanij / I.K. Bogolyubov, YU.A. Mitropol'skij. – Izd. 2-e. – М.: Fizmatgiz, 1958. – 408 s.
4. Babakov I.M. Teoriya kolebanij / I.M. Babakov. – М.: Gostekhizdat, 1958. – 628 s.
5. Svetlickij V.A. Sluchajnye kolebaniya mekhanicheskikh sistem / V.A. Svetlickij. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 216 s.
6. Panovko YA.G. Osnovy prikladnoj teorii kolebanij i udara / YA.G. Panovko. – L.: Mashinostroenie, 1976. – 320 s.
7. Biderman V.P. Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebanij / V.P. Biderman. – М.: Vyssh. shkola, 1972. – 414 s.
8. Vibracii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti tomah. T.1. Kolebaniya linejnyh sistem / Pod. red. V.V. Bolotina. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 352 s.
9. Vibracii v tekhnike. Spravochnik V 6-ti tomah. T.2. Kolebanie nelinejnyh mahanicheskikh sistem. – М.: Mashinostroenie, 1979. – 351 s.
10. Bolotin V.V. Dinamicheskaya ustojchivost' uprugih sistem

-
- / V.V. Bolotin. – М.: Gostekhizdat, 1956. – 600 s.
11. Svetlickij V.A. Sbornik zadach po teorii kolebanij / V.A. Svetlickij, I.V. Stacenko. – М.: Vyssh. shkola, 1973. – 454 s.
12. Meshcherskij I.V. Zadachi po teoreticheskoy mekhanike: Uchebnoe posobie dlya vuzov / I.V. Meshcherskij. – 38-e izd. – SPb.: Lan', 2010. – 448 s.
13. Bohonskij A.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem deformiruemyykh ob"ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya / A.I. Bohonskij, N.I. Varinskaya, M.N. Mozolevskij. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2007. – 296 s.
14. Bohonskij A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischisleniya v mekhanike / A.I. Bohonskij, N.I. Varinskaya. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 212 s.
15. Bohonskij, A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti. – М.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2016.–174s.
16. Bohonskij, A.I. Konstruirovaniye optimal'nykh upravleniy peremeshcheniem uprugih ob"ektov / A.I. Bohonskij, N.I. Varinskaya. – Izdatel'stvo: NIC MS, 2020. – 120 s.
17. Bohonskij A.I. Mekhanika upravlyаемого dvizheniya ob"ektov: uchebnoe posobie / A.I. Bohonskij, N.I. Varinskaya, T.V. Mozolevskaya. – М.: INFRA-M, 2021. – 170 s.
18. CHEbokrsarov V.V. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti dvuh skhem mayatnikovyykh preobrazovateley energii voln / V.V. CHEbokrsarov // Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. – 2016. T2. №1. – S. 68 – 75.
19. Bohonskij A.I. Uproshchyonnaya dinamicheskaya model' volnovoy energoustanovki / A.I. Bohonskij, M.M. Majstrishin, V.V. CHEbokrsarov // Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2022. – Vyp. №1 (17). – S. 20 – 24.

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

²*Рыжков Александр Игоревич, старший преподаватель,
ryzhkov2206@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

*DYNAMIC FORCES IN THE SUSPENSION ELEMENTS DURING
OSCILLATIONS OF THE PENDULUM IN A WAVE POWER PLANT*

A.I. Bokhonsky, A.I. Ryzhkov

Using a simplified dynamic model of a wave power plant, the oscillations of internal longitudinal forces in the bearing rods of a pendulum suspension under horizontal wave effects are studied. The values of periodic dynamic forces make it possible to evaluate the strength of the posts in terms of material fatigue.

Key words: wave power plant, pendulum oscillations, suspension design, dynamic internal forces.

Bokhonsky Alexander, doctor of technical sciences, professor, professor of the department «Digital Design», bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Ryzhkov Aleksandr, senior lecturer of the department «Digital Design», ryzhkov2206@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОВТОРЯЕМОСТИ ПО ОСИ Z МОДУЛЯ НА БАЗЕ МАНИПУЛЯТОРА ТИПА SCARA

Скитяев Д.И.¹, Дробитько А.И.², Лосев Д.В.³, Чаленков Н.И.⁴, Заморёнов И.М.⁵

Аннотация. Выполнено исследование точности повторяемости по оси Z модуля на базе манипулятора типа SCARA. Особенностью манипуляторов данного типа является рычажная система, которая обеспечивает перемещение конечного звена в плоскости XY за счет вращательных приводов рычагов механизма. Описана конструкция модуля на базе манипулятора типа SCARA, схемы исследования точности повторяемости (повторного выхода рабочего органа манипулятора на точку). Приведены результаты исследования повторного выхода рабочего органа манипулятора на точку.

Ключевые слова: манипулятор, SCARA, точность, повторяемость.

SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm – селективный сочлененный робот-манипулятор) – робот, по своему строению имеющий подобие человеческой руки, что позволяет работать в ограниченном пространстве и с высокой скоростью [1-6].

Целью статьи является исследование точности повторного выхода рабочего органа манипулятора на точку (повторяемости) исследуемого модуля.

Рассмотрим конструкцию исследуемого манипулятора. Механическая часть модуля (**Рис.1**) состоит из следующих элементов: основания, связанного с модулем линейного перемещения PLLM-11-300 по оси z (таблица 1). На модуль линейного перемещения посредством шести болтов крепится уголок с установленным на него планетарного редуктора PL57-10 (1:10) с серводвигателем BLDC BLM57130-1000. На выходной вал редуктора устанавливается фланец и первое плечо манипулятора. Серводвигатель посредством планетарного редуктора передает вращательный момент на первое плечо, за счет чего происходит вращение в плоскости XY. На конце первого плеча установлен серводвигатель с редуктором, который передает вращательный момент второму плечу, на которое устанавливается рабочий орган. Рабочий орган крепится посредством двух электромагнитов открытого типа OM-0730B-24-100%.

Управление манипулятором типа SCARA производится при помощи платы коммутации PLC5х, к которой подключены три драйвера

серводвигателей LEADSHINE ACS306. Связь с компьютером осуществляется посредством контроллера PLCM-LPT-2 (интерфейс USB) [7].

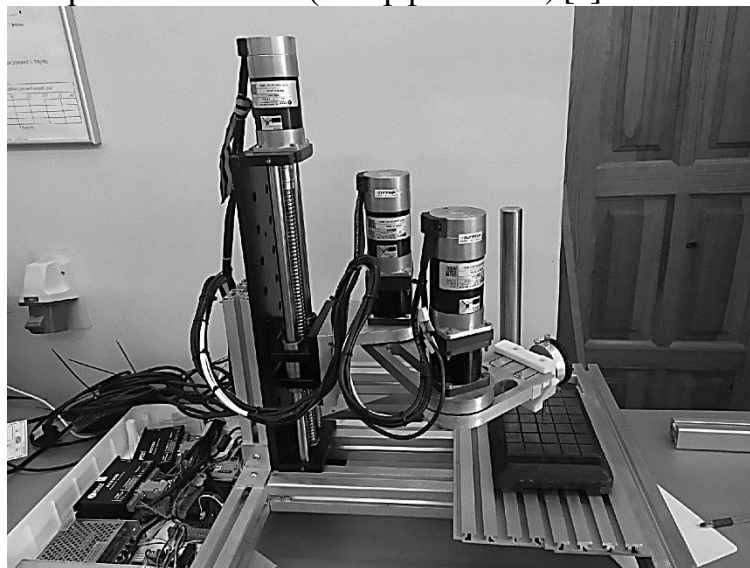


Рис.1 – Модуль на базе манипулятора типа SCARA

Таблица 1 – Технические характеристики PLLM-11-300

Техническая характеристика		Значение
Рабочий ход модуля, мм		300
Винт ШВП (диаметр/шаг) мм/мм		16/05
Диаметр направляющих валов, мм		16
Допуск прямолинейности, мм		0.05
Скорость перемещения, мм/мин		до 7000
Крепление под двигатель, мм		фланец 57
Максимальная нагрузка, кг	Горизонтальная установка	20
	Вертикальная установка	12
Масса модуля, кг		6.9
Допуск плоскостности опорной поверхности, мм		1.04

Для исследования повторяемости по оси Z вместо рабочего органа манипулятора устанавливается индикатор часового типа (**Рис.2**). Исследования выполнены в соответствии с ГОСТ Р 60.3.3.1-2016/ИСО 9283:1998 [8]. Показания снимались в пяти точках (**Рис.3**) при ходе манипулятора 40 мм и скоростях 10%, 50% и 100% при 50 итерациях.



Рис.2 – Исследование повторяемости по оси Z

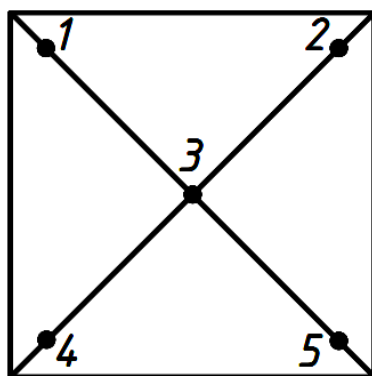


Рис.3 – Точки для исследования повторяемости по оси Z

Приведём данные исследования для точки 1 при различных значениях скорости подвода и отвода рабочего органа (таблица 2).

Таблица 2 – Показания индикатора для точки 1

Скорость 100%		Скорость 50%		Скорость 10%	
Итерация	Показания индикатора, мкм	Итерация	Показания индикатора, мкм	Итерация	Показания индикатора, мкм
1	-3	1	0	1	0
2	-2	2	1	2	1
3	-2	3	0	3	0
4	-3	4	0	4	-1
5	-3	5	1	5	-1
6	-3	6	-2	6	1
7	-3	7	0	7	0
8	-3	8	1	8	1
9	-4	9	-1	9	1

10	-3	10	-1	10	0
11	-2	11	1	11	0
12	-2	12	-1	12	-1
13	-3	13	1	13	-1
14	-3	14	1	14	1
15	-3	15	-1	15	-1
16	-3	16	0	16	0
17	-5	17	0	17	1
18	-3	18	0	18	0
19	-3	19	-1	19	1
20	-3	20	0	20	0
21	-4	21	0	21	-1
22	-3	22	-1	22	0
23	-3	23	-1	23	-1
24	-3	24	-1	24	0
25	-4	25	1	25	0
26	-3	26	1	26	-1
27	-3	27	0	27	1
28	-4	28	-1	28	1
29	-3	29	1	29	1
30	-2	30	-2	30	0
31	-2	31	-1	31	-1
32	-2	32	-1	32	-1
33	-2	33	1	33	0
34	-4	34	1	34	1
35	-4	35	0	35	-1
36	-3	36	0	36	0
37	-4	37	-1	37	0
38	-3	38	0	38	-2
39	-3	39	0	39	0
40	-3	40	-1	40	0
41	-3	41	-1	41	-1
42	-2	42	1	42	-1
43	-3	43	1	43	0
44	-3	44	1	44	1
45	-3	45	0	45	1
46	-2	46	0	46	-1
47	-2	47	-2	47	0
48	-3	48	-1	48	-1

49	-2	49	-1	49	-2
50	-3	50	1	50	-1

Точность повторяемости по оси Z определяется формулой

$$AP_Z = (\bar{Z} - Z_c),$$

где $Z_c = 0$ – базовая точка, $\bar{Z}$ – центр тяжести кластера точек находится по формуле:

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_j,$$

где $n=50$ – количество итераций.

Результаты исследования сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты исследования повторяемости по оси Z.

Номер точки	Скорость, %	Погрешность, мкм
1	100	2,94
	50	0,14
	10	0,14
2	100	2,86
	50	1,7
	10	1,38
3	100	0,26
	50	1,76
	10	1,58
4	100	3,2
	50	2,72
	10	2,04
5	100	2,12
	50	1,32
	10	0,02

Выводы.

В статье описана конструкция модуля на базе манипулятора типа SCARA и представлены результаты моделирования исследования повторяемости по оси Z. В дальнейшем будут произведены исследования повторяемости манипулятора по осям XY и исследована точность расположения рабочего органа.

Библиографический список

1. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. Книга 1 / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес; отв. ред. С.М. Каплунов. – М.: Наука, 2006. – 383 с.

2. Иванов А.А. Основы робототехники: учеб. Пособие / А.А. Иванов. – НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2011 – 200 с.
3. Бутенко В.И. Исследование вопросов точности позиционирования промышленного робота с рекуперацией энергии / В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Р.Г. Шаповалов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – №11 (160).
4. Oh Y. Robot accuracy evaluation using a ball-bar link system / Y Oh // Robotica. – 2011. – 29(6). – PP. 917-927.
5. Filipovich O. The Analysis of the Kinematic Characteristics of the Multifunctional Module Based on the SCARA Type Manipulator / O. Filipovich, N. Chalenkov, A. Balakin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – 2018. – P. 8602884. – DOI 10.1109/FarEastCon.2018.8602884.
6. Filipovich O. The Analysis of Geometrical, Kinematic and Accuracy Parameters of the Multifunctional SCARA-Module / O. Filipovich, N. Chalenkov, A. Balakin // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – P. 8934924. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934924.
7. Newfangled Solutions CNC Software Home of Mach3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.machsupport.com/> (Дата обращения: 02.08.2022 г.)
8. **ГОСТ Р 60.3.3.1-2016/ИСО 9283:1998** Роботы промышленные манипуляционные. Рабочие характеристики и соответствующие методы тестирования = Manipulating industrial robots. Performance criteria and related test methods: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2016 г. № 1866-ст: введен впервые : дата введения 2018- 01. - Текст непосредственный.

Bibliograficheskij spisok

1. 1. Korendyasev A.I. Teoreticheskie osnovy robototekhniki. V 2 kn. Kniga 1 / A.I. Korendyasev, B.L. Salamandra, L.I. Tyves; otv. red. S.M. Kaplunov. – М.: Nauka, 2006. – 383 s.
2. Ivanov A.A. Osnovy robototekhniki: ucheb. Posobie / A.A. Ivanov. – NGTU im. R.E. Alekseeva. Nizhnij Novgorod, 2011 – 200 s.
3. Butenko V.I. Issledovanie voprosov tochnosti pozicionirovaniya promyshlennogo robota s rekuperaciej energii / V.I. Butenko, D.S. Durov, R.G. SHapovalov // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. – 2014. – №11 (160).

4. Oh Y. Robot accuracy evaluation using a ball-bar link system / Y Oh // Robotica. – 2011. – 29(6). – PP. 917-927.
5. Filipovich O. The Analysis of the Kinematic Characteristics of the Multifunctional Module Based on the SCARA Type Manipulator / O. Filipovich, N. Chalenkov, A. Balakin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – 2018. – P. 8602884. – DOI 10.1109/FarEastCon.2018.8602884.
6. Filipovich O. The Analysis of Geometrical, Kinematic and Accuracy Parameters of the Multifunctional SCARA-Module / O. Filipovich, N. Chalenkov, A. Balakin // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – P. 8934924. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934924.
7. Newfangled Solutions CNC Software Home of Mach3 [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.machsupport.com/> (Data obrashcheniya: 02.08.2022 g.)
8. GOST R 60.3.3.1-2016/ISO 9283:1998 Roboty promyshlennye manipulyacionnye. Rabochie harakteristiki i sootvetstvuyushchie metody testirovaniya = Manipulating industrial robots. Performance criteria and related test methods: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii : izdanie oficial'noe : utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 30 noyabrya 2016 g. № 1866-st : vveden v pervye : data vvedeniya 2018- 01. - Tekst neposredstvennyj.

¹Скитяев Даниил Иванович, студент, skittles.dan@mail.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

²Дробитько Артем Игоревич, студент, artemdko@gmail.com, Россия, Севастопольский государственный университет

³Лосев Даниил Валерьевич, студент, ldaniil02@mail.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

⁴Чаленков Никита Игоервич, ассистент, chalenkov-nikita@yandex.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

⁵Заморёнов Илья Михайлович, студент, ilia.zamoryonov@gmail.com, Россия, Севастопольский государственный университет

STUDY OF REPEATIABILITY ACCORDING TO THE Z-AXIS OF A MODULE BASED ON A SCARA TYPE MANIPULATOR

D.I. Skityaev, A.I. Drobitko, D.V. Losev, N.I. Chalenkov, I.M. Zamoryonov

The article studies the repeatability accuracy along the Z axis of a module based on a SCARA type manipulator. A feature of manipulators of this type is the lever system, which ensures the movement of the final link of the manipulator in the XY plane due to the rotational drives of the levers of the mechanism. The description of the design of the module based on the SCARA type manipulator, the scheme for studying the accuracy of repeatability (repeated exit of the working body of the manipulator to a point) is given. And also the results of the study of the repeated exit of the working body of the manipulator to the point are presented.

Key words: manipulator, SCARA, accuracy, repeatability.

Daniil Ivanovich Skityaev, student, skittles.dan@mail.ru, Russia, Sevastopol State University

Drobitko Artem Igorevich, student, artemdko@gmail.com, Russia, Sevastopol State University

Losev Daniil Valerievich, student, ldaniil02@mail.ru, Russia, Sevastopol State University

Chalencov Nikita Igoevich, assistant, chalencov-nikita@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 519.873

СТАЦИОНАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С ПОТЕРЯМИ И КОНТРОЛЕМ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Песчанский А.И.

***Аннотация.** Объектом исследования является двухкомпонентная система массового обслуживания с потерями, простейшим входящим потоком и временами обслуживания заявок общего вида. Предполагается, что после завершения обслуживания заявки каждым прибором осуществляется контроль над качеством его проведения. В случае неудовлетворительного обслуживания заявка сразу же направляется на повторное обслуживание, которое повторяется до тех пор, пока обслуживание не будет признано удовлетворительным. Построена математическая модель функционирования системы, найдены финальные вероятности и средние стационарные времена пребывания системы в различных физических состояниях.*

***Ключевые слова.** Двухкомпонентная система, контроль качества обслуживания, финальные вероятности состояний, средние стационарные времена пребывания в состояниях*

Введение. Системы массового обслуживания изучались многими авторами. Обзор результатов этих исследований можно найти, например, в [1–6]. Продолжающийся интерес к изучению этих систем обусловлен, как широкими практическими приложениями, так и новыми математическими методами исследований. Одним из важных требований к системам обслуживания является качественное обслуживание заявок. Поэтому представляет интерес определить характеристики системы при наличии контроля над качеством. В работах [7–10] построены полумарковские модели однокомпонентных обслуживания систем обслуживания, в которых случае неудовлетворительного обслуживания заявка возвращается на повторное обслуживание. В продолжение этих работ в данной статье изучается двухкомпонентная система при наличии контроля над качеством обслуживания.

Постановка задачи. Рассмотрим двухканальную систему обслуживания $M/G/2/0$ в классификации Кендалла [11]. Длительность обслуживания заявки каждым прибором — случайная величина (СВ) α с функцией распределения (ФР) $F(t) = P\{\alpha \leq t\}$ и плотностью распределения

(ПР) $f(t)$. Время между поступлениями заявок — СВ β с ФР $G(t) = 1 - e^{-\lambda t}$. Если приборы заняты обслуживанием заявок, то поступающие в систему заявки теряются. Сразу же после окончания обслуживания заявки мгновенно осуществляется контроль качества обслуживания. С вероятностью p обслуживание заявки признается успешным, и прибор переходит в режим ожидания следующей заявки. С вероятностью $q = 1 - p$ обслуживание заявки признается неудовлетворительным, и прибор немедленно приступает к повторному обслуживанию заявки. Время повторного обслуживания — СВ γ с абсолютно непрерывной ФР $\Phi(t) = P\{\gamma \leq t\}$ и плотностью $\varphi(t)$. После повторного обслуживания с вероятностью p обслуживание признается успешным, а с вероятностью q заявка отправляется на повторное обслуживание. Процесс обслуживания заявки повторяется до тех пор, пока обслуживание не будет признано успешным. Предполагается, что СВ α и γ независимы, имеют конечные математические ожидания $M\alpha$ и $M\gamma$ соответственно.

Цель работы — найти финальные вероятности пребывания системы в различных физических состояниях, определить средние стационарные времена пребывания в этих состояниях и исследовать влияние качества обслуживания заявок на эти характеристики.

Построение математической модели. Для построения модели функционирования рассматриваемой системы обслуживания используем полумарковский процесс $S(t)$ с дискретно-непрерывным множеством состояний [12,13]. Для задания этого процесса введем фазовое пространство состояний E , вероятности и плотности вероятностей переходов из состояний, а также времена пребывания в состояниях.

Начнем с описания пространства фазовых состояний системы. Каждый прибор может находиться в следующих физических состояниях: 0 — быть свободным и ожидать заявку; 1 — обслуживать заявку в первый раз; 2 — обслуживать заявку повторно. Физические состояния системы могут быть заданы двухкомпонентным вектором $\bar{d} = (d_1, d_2)$, каждая компонента которого описывает физическое состояние соответствующего прибора.

Для того чтобы в моменты изменения физических состояний каналов система обладала марковским свойством, перед вектором физических состояний укажем номер прибора, который изменил свое физическое состояние последним, а также расширим фазовое пространство некоторых состояний добавлением непрерывных составляющих.

Если в момент изменения физического состояния одного из приборов, второй был свободен, то это состояние не расширяем. В случае, когда

второй прибор занят обслуживанием, то добавляем непрерывную компоненту x — оставшееся время обслуживания заявки этим прибором.

Таким образом, фазовое пространство состояний системы включает в себя дискретные состояния вида $1(d_1, 0)$, $d_1 = 0, 1, 2$; $2(0, d_2)$, $d_2 = 0, 1, 2$. Например, состояние $2(0, 2)$ означает, что последним изменил состояние второй прибор (начал повторное обслуживание заявки), а первый прибор свободен. Кроме дискретных состояний фазовое пространство E содержит состояния вида $1(d_1, d_2)(0, x)$, $d_1 = 0, 1, 2$; $d_2 = 1, 2$; $2(d_1, d_2)(x, 0)$, $d_1 = 1, 2$; $d_2 = 0, 1, 2$; где x — оставшееся время обслуживания заявки соответствующим прибором. Например, $1(1, 2)(0, x)$ — первый прибор начал обслуживать поступившую заявку, второй прибор занят повторным обслуживанием заявки, до конца которого осталось время x .

Времена пребывания системы в состояниях определяются минимумом факторов, обуславливающих изменение физических состояний приборов. Так, времена пребывания системы в состояниях $2(0, 2)$ и $1(1, 2)(0, x)$ соответственно равны $\theta_{2(0, 2)} = \beta \wedge \gamma$, $\theta_{1(1, 2)(0, x)} = \alpha \wedge x$, где $\wedge$ — знак минимума.

Вероятности переходов вложенной цепи Маркова определяются реализацией минимума факторов, влияющих на изменение физических состояний приборов. Например, из состояния $2(0, 2)$ в случае $\beta < \gamma$ система переходит в состояние $1(1, 2)(0, x)$ с плотностью вероятности перехода

$$p\{2(0, 2) \rightarrow 1(1, 2)(0, x)\} = \lambda \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \varphi(t+x) dt, \quad x > 0,$$

если $\beta > \gamma$, то система переходит в состояния $2(0, 0)$ или $2(0, 2)$ соответственно с вероятностями

$$P\{2(0, 2) \rightarrow 2(0, 0)\} = p \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \varphi(t) dt, \quad P\{2(0, 2) \rightarrow 2(0, 2)\} = q \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \varphi(t) dt.$$

Стационарное распределение вложенной цепи Маркова находится из системы уравнений

$$\rho(B) = \int_E \rho(dx) P(x, B),$$

где $P(x, B)$ — вероятность перехода из состояния x во множество состояний B ; $\rho(\cdot)$ — стационарное распределение вложенной цепи Маркова.

Обозначим $\rho_{1(d_1, 0)}$ и $\rho_{2(0, d_2)}$ — стационарные вероятности состояний $1(d_1, 0)$, $d_1 = 0, 1, 2$, и $2(0, d_2)$, $d_2 = 0, 1, 2$, соответственно; $\rho[1(d_1, d_2)(0, x)]$ и $\rho[2(d_1, d_2)(x, 0)]$ — стационарные плотности состояний $1(d_1, d_2)(0, x)$, $d_1 = 0, 1, 2$; $d_2 = 1, 2$; и $2(d_1, d_2)(x, 0)$, $d_1 = 1, 2$; $d_2 = 0, 1, 2$, соответственно.

В рассматриваемой модели система содержит восемнадцать уравнений. Выпишем для примера два из них

$$\rho_{2(02)} = q \int_0^{\infty} f(t) e^{-\lambda t} dt \rho_{2(01)} + q \int_0^{\infty} \varphi(t) e^{-\lambda t} dt \rho_{2(02)},$$

$$\rho[1(12)(0x)] = \lambda \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \rho[1(02)(0, x+t)] dt + \lambda \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \varphi(t+x) dt \rho_{2(02)}.$$

Непосредственной подстановкой можно убедиться, что решениями этого уравнения являются функции

$$\rho_{1(10)} = \rho_{2(01)} = \rho_{2(00)} = \rho_{1(00)} = \frac{c}{\lambda}; \quad \rho_{2(02)} = \rho_{1(20)} = \frac{q}{p} \frac{c}{\lambda};$$

$$\rho[1(21)(0x)] = \rho[2(12)(x0)] = c \frac{q}{p} \bar{F}(x), \quad \rho[1(22)(0x)] = \rho[2(22)(x0)] = c \left(\frac{q}{p} \right)^2 \bar{\Phi}(x),$$

$$\rho[1(11)(0x)] = \rho[2(11)(x0)] = \rho[1(01)(0x)] = \rho[2(10)(x0)] = c \bar{F}(x), \quad (1)$$

$$\rho[1(12)(0x)] = \rho[2(21)(x0)] = \rho[1(02)(0x)] = \rho[2(20)(x0)] = c \frac{q}{p} \bar{\Phi}(x),$$

где $\bar{F}(x) = 1 - F(x)$, $\bar{\Phi}(x) = 1 - \Phi(x)$. Значение произвольной постоянной c определяется из условия нормировки

$$c = \lambda p \left\{ 2(1+p) \left[1 + \lambda \left(M\alpha + \frac{q}{p} M\gamma \right) \right] \right\}^{-1}.$$

Финальные вероятности состояний. Разобьем фазовое пространство состояний системы на непересекающиеся подмножества $E = E_2 \cup E_1 \cup E_0$. К подмножеству E_2 (оба прибора заняты) отнесем все состояния, для которых компоненты вектора физических состояний $\bar{d}$ принимают значения 1 или 2. Подмножество E_1 (один прибор занят, второй свободен) включает в себя состояния, в которых одна из компонент вектора физических состояний равна 0. Подмножество E_0 (оба прибора свободны) образуют состояния с нулевыми компонентами вектора физических состояний, т.е. $E_0 = \{1(0,0); 2(0,0)\}$.

Финальные вероятности пребывания системы в указанных подмножествах состояний находятся с помощью предельных соотношений [12,13]

$$p_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{S(t) \in E_i / S(0) = x\} = \int_{E_i} m(x) \rho(dx) \left(\int_E m(x) \rho(dx) \right)^{-1}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (2)$$

где $m(x)$ — среднее время пребывания системы в состоянии $x \in E$, $\rho(\cdot)$ — стационарное распределение вложенной цепи Маркова.

Не составляет труда выписать средние времена пребывания рассматриваемой системы в состояниях. Например, для состояний $1(2,0)$, $1(1,1)(0,x)$ и $2(1,2)(x,0)$ эти времена определяются соответственно формулами

$$E\theta_{1(2,0)} = \int_0^{\infty} \bar{\Phi}(t) e^{-\lambda t} dt, \quad E\theta_{1(1,1)(0,x)} = \int_0^x \bar{F}(t) dt, \quad E\theta_{2(1,2)(x,0)} = \int_0^x \bar{\Phi}(t) dt.$$

Используя выражения для средних времен, а также найденную плотность стационарного распределение вложенной цепи Маркова, интегралы в (2) в результате преобразований принимают вид

$$\int_{E_2} m(x) \rho(dx) = c \left(M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma \right)^2; \quad \int_{E_1} m(x) \rho(dx) = \frac{2c}{\lambda} \left(M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma \right); \quad \int_{E_0} m(x) \rho(dx) = \frac{2c}{\lambda^2};$$

С учетом полученных выражений и обозначений финальные вероятности состояний: оба прибора свободны, один прибор свободен, оба прибора заняты — определяются соответственно формулами

$$p_0 = \left[1 + \lambda \left(M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma \right) + \frac{\lambda^2}{2} \left(M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma \right)^2 \right]^{-1}; \quad (3)$$

$$p_1 = \lambda \left(M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma \right) p_0; \quad p_2 = \frac{\lambda^2}{2} \left(M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma \right)^2 p_0.$$

Если в системе качество обслуживания заявок не контролируется, то формулы (3) совпадают с полученными ранее (например, в [2]), в частности, при $q=0$ и $M\alpha=1/\mu$ получаются формулы Эрланга для системы $M/M/2/0$.

Средние стационарные времена пребывания системы в состояниях. Среднее стационарное время пребывания системы в состоянии E_i найдем с помощью соотношений [12,13]

$$T(E_i) = \int_{E_i} m(x) \rho(dx) \left[\int_{E \setminus E_i} \rho(dx) P(x, E_i) \right]^{-1}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (4)$$

где $P(x, E_i)$ — вероятности переходов из состояния x в подмножество состояний E_i .

В результате преобразований соотношения (4) с учетом вероятностей переходов системы из состояний и стационарного распределения вложенной цепи Маркова получаем

$$T(E_0) = 1/\lambda; \quad T(E_1) = \frac{M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma}{1 + \lambda \left(M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma \right)}; \quad T(E_2) = \frac{1}{2} \left(M\alpha + \frac{q}{p} M \gamma \right).$$

Пример. В двухканальную систему обслуживания поступает простейший поток заявок с интенсивностью $\lambda = 10 \text{ час}^{-1}$. Среднее время первого обслуживания заявок $M\alpha = 0,04 \text{ часа}$, среднее время повторного обслуживания — $M\gamma = 0,03 \text{ часа}$. Вероятность качественного обслуживания $p = 0,8$. Вычисление стационарных характеристик по формулам (3) и (4) приводит к следующим результатам:

$$p_0(0,8) = 0,630, \quad p_1(0,8) = 0,299, \quad p_2(0,8) = 0,071, \\ T_0(0,8) = 0,100 \text{ часа}, \quad T_1(0,8) = 0,032 \text{ часа}, \quad T_2(0,8) = 0,024 \text{ часа}.$$

В случае отсутствия контроля качества обслуживания аналогичные характеристики

$$p_0(1) = 0,676, \quad p_1(1) = 0,270, \quad p_2(1) = 0,054, \\ T_0(1) = 0,100 \text{ часа}, \quad T_1(1) = 0,029 \text{ часа}, \quad T_2(1) = 0,020 \text{ часа}.$$

Наличие в системе контроля качеством обслуживания приводит к увеличению на 4,6% количества заявок в поступающем потоке, которые, получают отказ в обслуживании.

Графики зависимостей финальных вероятностей системы $p_0(p)$, $p_1(p)$ и $p_2(p)$ от вероятности качественного обслуживания p представлены на Рис.1.

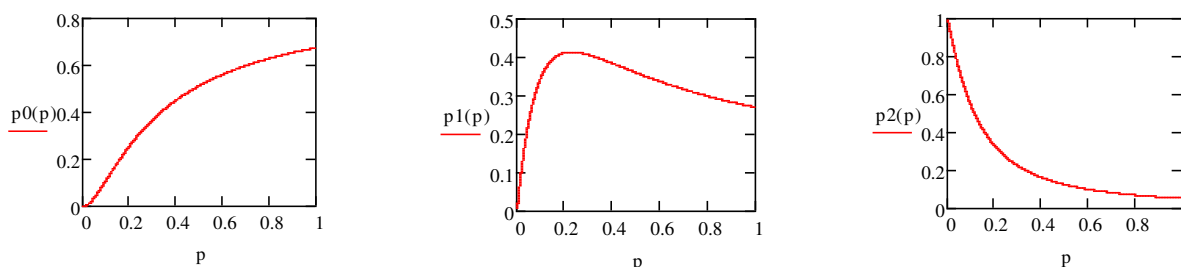


Рис.1 – Зависимости финальных вероятностей состояний системы от вероятности качественного обслуживания

Заключение. С помощью аппарата полумарковских процессов с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний построена модель функционирования двухканальной системы $M/G/2/0$, в которой осуществляется контроль над качеством обслуживания заявок. Установлены расчетные формулы для вычисления стационарных характеристик системы, с помощью которых можно оценить влияние качества обслуживания заявок на финальные вероятности пребывания системы в различных физических состояниях и средние стационарные времена пребывания в этих состояниях.

Библиографический список

1. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
2. Бочаров П.П. Теория массового обслуживания / П.П. Бочаров, А.В. Печинкин – М.: Изд-во РУДН, 1995. – 529 с.
3. Климов Г.П. Стохастические системы обслуживания / Г.П. Климов. – М.: Наука. 1966. – 244 с.
4. Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. Итоги науки. Сер. Теор. вероятн. 1963, ВИНТИ, М., 1965. – С. 73–122.
5. Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. Итоги науки. Сер. Теор. вероятн. Мат. стат. Теор. кибернет. 1970, ВИНТИ, М., 1971. – С. 5–109.
6. Коваленко И.Н. Обзор моих научных работ. Учителя и соратники. // Кибернетика и системный анализ. – 2010. – № 3. – С. 3–27.
7. Peschansky A.I. Stationary Characteristics of the Single-Server Queue System with Losses and Immediate Service Quality Control / A.I. Peschansky // Applied Mathematics. – 2011. – Vol.2. – No4. – P.403–409. doi: 10.4236/am.2011.24049.
8. Песчанский А.И. Полумарковская модель однолинейной системы с потерями и мгновенным контролем качества обслуживания / А.И. Песчанский // Весн. СевНТУ: сер. Информатика, электроника, связь. – 2011. – Вып.114. – С. 47–52.
9. Песчанский А.И. Полумарковская модель однолинейной системы обслуживания с потерями и диагностикой качества обслуживания в момент поступления следующей заявки / А.И. Песчанский // Вестн. СевГТУ: Автоматизация процессов и управление. – 2012. – Вып. 125. – С.55–62.
10. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
11. Kendall D. Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain. // Ann. Math. Statistics. 1953. – Vol. 24, No 3. – P. 338–354.
12. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.
13. Корлат А.Н. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.И. Новиков, А.Ф. Турбин. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 276 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Gnedenko B.V. Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya / B.V. Gnedenko, I.N. Kovalenko. – M.: Nauka, 1987. – 336 s.
2. Bocharov P.P. Teoriya massovogo obsluzhivaniya / P.P. Bocharov, A.V. Pechinkin – M.: Izd-vo RUDN, 1995. – 529 s.
3. Klimov G.P. Stohasticheskie sistemy obsluzhivaniya / G.P. Klimov. – M.: Nauka. 1966. – 244 s.
4. Kovalenko I.N. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. Itogi nauki. Ser. Teor. veroyatn. 1963, VINITI, M., 1965. – S. 73–122.
5. Kovalenko I.N. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. Itogi nauki. Ser. Teor. veroyatn. Mat. stat. Teor. kibernet. 1970, VINITI, M., 1971. – S. 5–109.
6. Kovalenko I.N. Obzor moih nauchnyh rabot. Uchitelya i soratniki. // Kibernetika i sistemnyj analiz. – 2010. – № 3. – S. 3–27.
7. Peschansky A.I. Stationary Characteristics of the Single-Server Queue System with Losses and Immediate Service Quality Control / A.I. Peschansky // Applied Mathematics. – 2011. – Vol.2. – No4. – P.403–409. doi: 10.4236/am.2011.24049.
8. Peschanskij A.I. Polumarkovskaya model' odnolinejnoj sistemy s poteryami i mgnovennym kontrolem kachestva obsluzhivaniya / A.I. Peschanskij // Vesn. SevNTU: ser. Informatika, elektronika, svyaz'. – 2011. – Vyp.114. – S. 47–52.
9. Peschanskij A.I. Polumarkovskaya model' odnolinejnoj sistemy obsluzhivaniya s poteryami i diagnostikoj kachestva obsluzhivaniya v moment postupleniya sleduyushchej zayavki / A.I. Peschanskij // Vestn. SevGTU: Avtomatizaciya processov i upravlenie. – 2012. – Vyp. 125. – S.55 –62.
10. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
11. Kendall D. Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain. // Ann. Math. Statistics. 1953. – Vol. 24, No 3. – P. 338–354.
12. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem. K.: Nauk. dumka, 1982. – 236 s.
13. Korlat A.N. Polumarkovskie modeli vosstanavlivaemyh sistem i sistem massovogo obsluzhivaniya / A.N. Korlat, V.N. Kuznecov, M.I. Novikov, A.F. Turbin. – Kishinev: SHtiinca, 1991. – 276 s.

*Песчанский Алексей Иванович, д.т.н., профессор,
peschansky_sntu@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

*STATIONARY CHARACTERISTICS OF A TWO-SERVER LOSS
QUEUEING SYSTEM WITH REGARD TO SERVICE QUALITY CONTROL*

A.I. Peschansky

The object of the study is a two-server loss queueing system. Poisson incoming flow and arbitrary distributions of service times are considered. After each request service its quality control is carried out. In case of unsatisfactory service quality, the request undergoes recurrent service immediately. The service is repeated until it is regarded as satisfactory. The mathematical model of the queueing system operation is constructed. The final probabilities and the average stationary sojourn times in the system physical states are obtained.

Keywords: two-server queueing system, service quality control, final probabilities of states, average stationary sojourn times in states

Peschansky Alersey Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, peschansky_sntu@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ СПЕЦИАЛЬНОГО-НАЗНАЧЕНИЯ

Поляков А.А.¹, Моисеев Д.В.², Мащенко Е.Н.³

Аннотация. В статье поднимается вопрос о необходимости разработки системы поддержки принятия решения по управлению структурно-сложными организационно-техническими системами военного-назначения на базе общего логико-вероятностного метода. В качестве прототипа в системе поддержки принятия решения применяется общий логико-вероятностный метод с возможностями учета условий и ограничений исследуемых систем, носящих вероятностный характер, а также включение дополнительных инструментов, таких как имплицативный блок, представленный блоком выполнения заданного условия и функциональный элемент с накапливающим показателем.

Ключевые слова. Методика выбора эффективной стратегии решения, система поддержки принятия решения, автоматизация поддержки принятия решения, общий логико-вероятностный метод, моделирование, несовместные и совместные события.

Как известно, системы поддержки принятия решений (СППР) предназначены для поддержки многокритериальных решений (результаты принимаемых решений оцениваются не по одному, а по совокупности многих показателей (критериев) рассматриваемых одновременно) в сложной информационной среде [1-4].

Актуальность рассматриваемого вопроса заключается в необходимости разработки универсальной СППР различного назначения и обуславливается протекающими процессами и происходящими событиями в современном мире [5].

Понимая всю важность подготовительного цикла принятия решения, способствующего выработке грамотного, всесторонне взвешенного решения на применение специальных сил, авторы статьи предлагают свой взгляд на развитие СППР различного назначения, где силы и специальная техника рассматриваются, как структурно-сложные организационно-технические системы (ОТС), ведь правильно выработанное решение приведет к гарантированному результату и эффективному решению поставленных задач [5,6].

Основная идея статьи заключается в расширении возможностей применения общего логико-вероятностного метода (далее ОЛВМ) к структурно сложным, многомерным ОТС, путем наращивания ОЛВМ новыми инструментами [7-8]. Первый – это блок выполнения заданного критерия (далее БВЗК), второй инструмент – это функциональный элемент с накаливающим показателем (далее ФЭНП).

Рассмотрим функционирование предлагаемых инструментов каждого в отдельности, а также в связке друг с другом и в составе ОЛВМ.

Представляя структурно-сложные ОТС, растянутые во времени в виде схемы функциональной целостности (далее СФЦ), исследователь (пользователь, оператор) рассматриваемой системы сталкивается с вопросом необходимости совершения структурного перехода по принципу «если то...» по СФЦ при построении логической функции работоспособности системы (далее ФРС) и вероятностной функции (далее ВФ). Применяя только классический ОЛВМ данный принцип реализовать проблематично, но расширив ОЛВМ таким инструментом как БВЗК, появляется возможность совершать структурный переход по принципу «если то...» по СФЦ ОТС.

Для учета условий и ограничений, носящих вероятностный характер и определяющих функционирование ОТС предлагается отойти от классических канонов построения логической ФРС для всей структуры рассматриваемой ОТС, представленной в виде СФЦ, путем проведения декомпозиции общей СФЦ на блоки, носящие логически завершенные умозаключения, где исход каждого блока будет иметь вычисляемый вероятностный показатель - показатель функционирования (боевая устойчивость, устойчивость (надежность, стойкость, живучесть) и т.д). Данный показатель каждого блока будет проверяться с критерием, заданным в БВЗК, на основании этого будет совершаться структурный переход к следующему зависимому декомпозированному блоку, пока не будут пройдены все зависимые блоки СФЦ.

Применение БВЗК в структуре СФЦ представлено в примере ниже:

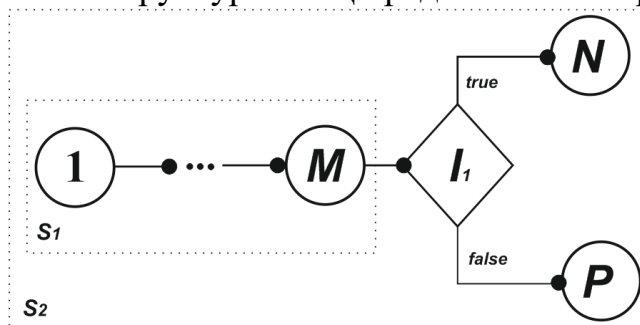


Рис.1 – Схематичное представление БВЗК

где: I - блок выполнения заданного вероятностного условия:

$$Y_{S1} = X_M \cdots X_1; \quad (1)$$

$$I_1(l \leq P_{S1} \leq r).$$

где: Y_{S1} - логический критерий функционирования рассматриваемого блока;
 P_{S1} - вероятностный показатель функционирования рассматриваемого блока;
 $I_1(l \leq P_{S1} \leq r)$ - заданный критерий в БВЗК; l - левая граница заданного критерия в БВЗК, носит вероятностный характер; r - правая граница заданного критерия в БВЗК, носит вероятностный характер.

Логическая ФРС для примера, представленного на **Рис.1** примет вид.

$$Y_{S2} = Y_N \cdot Y_{S1} = X_N \cdot X_M \cdots X_1, \text{ при } I_1 = true. \quad (2)$$

$$Y_{S2} = Y_P \cdot Y_{S1} = X_P \cdot X_M \cdots X_1, \text{ при } I_1 = false.$$

Вероятностная функция для системы, представленной на **Рис.1** строится по (2) и примет вид:

$$P_{S2} = P_N \cdot P_M \cdots P_1, \text{ при } I_1 = true. \quad (3)$$

$$P_{S2} = P_P \cdot P_M \cdots P_1, \text{ при } I_1 = false.$$

Последовательное применение БВЗК в структуре СФЦ представлено в примере ниже:

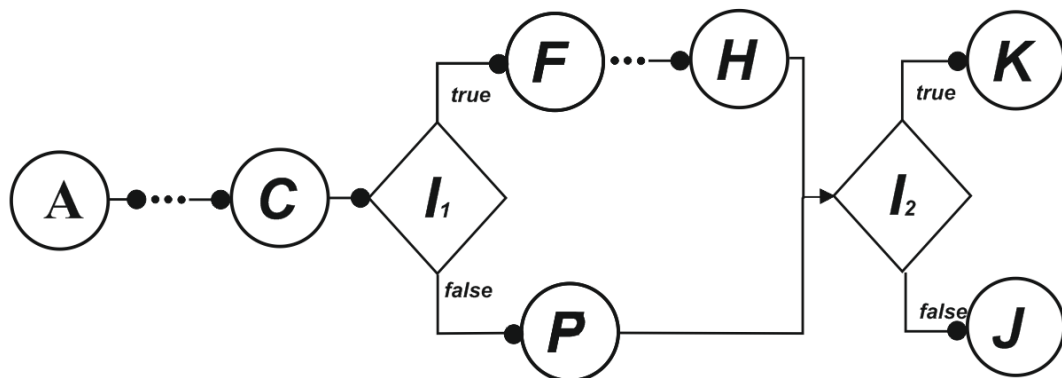


Рис.2 – Представление последовательных БВЗК при построении СФЦ

При проходе СФЦ, представленной на **Рис.2** с учетом выполнения условий в БВЗК, логическая ФРС примет одно из четырех состояний:

$$Y_S = Y_A \cdots Y_C \cdot Y_F \cdots Y_H \cdot Y_K, \text{ при } I_1 = true, I_2 = true,$$

$$Y_S = Y_A \cdots Y_C \cdot Y_F \cdots Y_H \cdot Y_J, \text{ при } I_1 = true, I_2 = false,$$

$$Y_S = Y_A \cdots Y_C \cdot Y_P \cdot Y_K, \text{ при } I_1 = false, I_2 = true,$$

$$Y_S = Y_A \cdots Y_C \cdot Y_P \cdot Y_J, \text{ при } I_1 = false, I_2 = false. \quad (4)$$

Вероятностные функции для СФЦ, представленной на рис.2, строится по (4) в зависимости от условия задачи.

Таким образом, введение инструмента как БВЗК в ОЛВМ позволяет учитывать условие и ограничения ОТС, представленными вероятностными показателями, строить логическую ФРС и вероятностную функцию не для всей структурно-сложной, многомерной СФЦ, а только для структурно-зависимых декомпозированных блоков. При этом данный подход является полностью автоматизированным, также повышается наглядность графического восприятия структурно-зависимых блоков в СФЦ.

Рассмотрим второй предлагаемый инструмент - функциональный элемент с накаливающим показателем (ФЭНП).

Пусть ОТС представлена СФЦ на **Рис.3**.

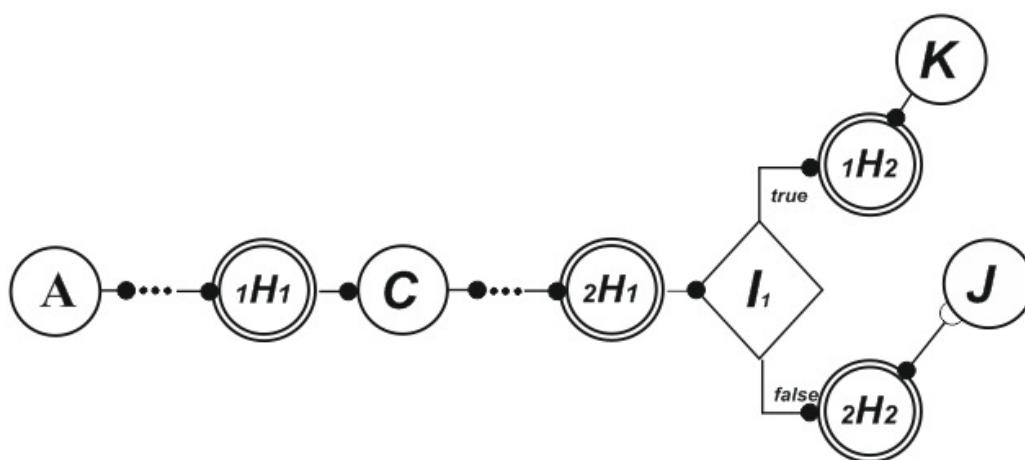


Рис.3 – СФЦ ОТС с применением ФЭНП

где: ФЭНП, имеет маску nHm , n - порядковый номер ФЭНП, m - число предыдущих вложений ФЭНП

Содержание функционирования ФЭНП заключается в том, что он накапливает все вычисления, которые происходят до его включения в структуру СФЦ.

Так для $1H_1$, логическая ФРС примет вид:

$$Y_{1H_1} = X_{1H_1} \cdot X_A. \quad (5)$$

Для $2H_1$, логическая ФРС примет вид:

$$Y_{2H_1} = Y_A \cdot Y_{1H_1} \cdot Y_C = X_{2H_1} \cdot X_A \cdot X_{1H_1} \cdot X_C. \quad (6)$$

Для $1H_2$, логическая ФРС примет вид:

$$Y_{1H_2} = X_{1H_1} \cdot X_A \cdot X_K, \text{ при } I_1 = \text{true}. \quad (7)$$

Для $2H_2$, логическая ФРС примет вид:

$$Y_{2H_2} = X_{2H_1} \cdot X_A \cdot X_{1H_1} \cdot X_C \cdot \overline{X_J}, \text{ при } I_1 = \text{false}. \quad (8)$$

Таким образом, применяя инструменты БВЗК и ФЭНП, появляется возможность проводить декомпозицию структурно-сложной исследуемой

ОТС с возможностью учитывать все особенности, связанные с условиями и ограничениями систем.

Выводы. Таким образом, на основании проделанной работы можно сделать вывод, о необходимости и, самое главное, возможности совершенствования общего логико-вероятностного метода путём добавления в него нового инструментария. Предложено внедрить дополнительно два инструмента в общий логико-вероятностный метод, первый инструмент - блок выполнения заданного критерия и второй инструмент – функциональный элемент с накапливающим показателем.

Анализ полученных результатов в связи с вводом предлагаемых инструментов показал значительное увеличение спектра решаемых задач общим логико-вероятностным методом и применение его в качестве прототипа в системе поддержки принятия решения по управлению структурно-сложными организационно-техническими системами специального назначения.

Работа подготовлена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-29-06023 «Методы структурного синтеза каналов информационного обмена между беспилотным транспортным средством и диспетчерским центром на основе стохастического векторного программирования с вероятностными критериями» и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук, проект МД-260.2022.1.6 «Методология вероятностного представления и преобразования информации для структурного синтеза высокопроизводительных, энергоэффективных вычислительных устройств, построенных на отечественной элементной базе»

Библиографический список

1. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. – 154 с.
2. Саати Т.Л. Принятие решений - Метод Анализа Иерархий / Т.Л. Саати. – М.: Радио и Связь. 1993. – 211 с.
3. Тиханыхев О.В. Системы поддержки принятия решений – перспективное направление развития автоматизации управления войсками (силами) / О.В. Тиханыхев // Военная мысль. – 2012. – № 8. – С. 45–51.
4. Tikhanychev O.V. Decision-making support systems: prospects for troops control automation / O.V. Tikhanychev // Military Thought. – 2012. – vol. 21, iss. 3. – pp. 74–83.

5. Поляков А.А. Вычисление показателя надежности функциональных элементов в технических, организационно-технических системах / А.А. Поляков, Д.В. Моисеев // Сборник Международного научного форума «Наука и инновации – современные концепции». – 2019 г. – С. 118-126.
6. Поляков А.А. Комплекс методик декомпозиции структурно-сложных систем различного назначения / А.А. Поляков, Д.В. Моисеев // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe* (East European Scientific Journal). 2019. – № 7(47). – С. 66 – 70.
7. Поляков А.А. Методика полной декомпозиции структуры технической системы / А.А. Поляков, Д.В. Моисеев // Сборник научных трудов «Национальная ассоциация ученых» Екатеринбург: 620144. – 2019. – № 45 – С. 28 – 31.
8. Патент RU 187 997 U1 Российская Федерация, МПК G06F 17/18 (2006.01) G06F 7/57 (2006.01) Вероятностное устройство нахождения аналитической вероятности для группы совместных событий в неориентированном графе / А.А. Поляков, Д.В. Моисеев, А.А. Перепадин / ФГБВОУ ВО ЧВВМУ им. П.С. Нахимова Министерства обороны Российской Федерации (RU). – № 2018140365, заявл. 15.11.2018, опубликовано: 26.03.2019 Бюл. № 9.

Bibliograficheskiy spisok

1. Larichev O.I. Teoriya i metody prinyatiya reshenij, a takzhe Hronika sobytij v Volshebnyh Stranah / O.I. Larichev. – M.: Logos, 2000. – 154 s.
2. Saati T.L. Prinyatie reshenij - Metod Analiza Ierarhij / T.L. Saati. – M.: Radio i Svyaz'. 1993. – 211 s.
3. Tikhanychev O.V. Sistemy podderzhki prinyatiya reshenij – perspektivnoe napravlenie razvitiya avtomatizacii upravleniya vojskami (silami) / O.V. Tikhanychev // *Voennaya mysl'*. – 2012. – № 8. – S. 45–51.
4. Tikhanychev O.V. Decision-making support systems: prospects for troops control automation / O.V. Tikhanychev // *Military Thought*. – 2012. – vol. 21, iss. 3. – pp. 74–83.
5. Polyakov A.A. Vychislenie pokazatelya nadezhnosti funkcional'nyh elementov v tekhnicheskikh, organizacionno-tekhnicheskikh sistemah / A.A. Polyakov, D.V. Moiseev // *Sbornik Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma «Nauka i innovacii – sovremennye koncepcii»*. – 2019 g. – S. 118-126.
6. Polyakov A.A. Kompleks metodik dekompozicii strukturno-slozhnyh sistem razlichnogo naznacheniya / A.A. Polyakov, D.V. Moiseev // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe* (East European Scientific Journal). 2019. – № 7(47). – S. 66 – 70.

7. Polyakov A.A. Metodika polnoj dekompozicii struktury tekhnicheskoy sistemy / A.A. Polyakov, D.V. Moiseev // Sbornik nauchnyh trudov «Nacional'naya asociaciya uchenykh» Ekaterinburg: 620144. – 2019. – № 45 – S. 28 – 31.
8. Patent RU 187 997 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK G06F 17/18 (2006.01) G06F 7/57 (2006.01) Veroyatnostnoe ustrojstvo nahozhdeniya analiticheskoy veroyatnosti dlya gruppy sovmestnyh sobytij v neorientirovannom grafe / A.A. Polyakov, D.V. Moiseev, A.A. Perepadin / FGBVOU VO CHVVMU im. P.S. Nahimova Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii (RU). – № 2018140365, zayavl. 15.11.2018, opublikovano: 26.03.2019 Byul. № 9.

Поляков Александр Александрович, к.т.н., доцент, sansanich44@mail.ru, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военноморское училище им. П.С. Нахимова.

Моисеев Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент, профессор, dvmoiseev@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Машченко Елена Николаевна, к.т.н., доцент, elmachenko@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR MANAGING STRUCTURALLY COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS OF SPECIAL PURPOSE

A.A. Polyakov, D.V. Moiseev, E.N. Mashchenko

The article raises the question of the need to develop a decision support system for the management of structurally complex organizational and technical systems for military purposes based on a common logico-probabilistic method. As a prototype, a general logical-probabilistic method is used in decision support systems with the possibility of taking into account the conditions and limitations of the systems under study, which are probabilistic in nature, as well as the inclusion of additional tools, such as an implicative block represented by a block of fulfillment of a given condition and a functional element with a heating display.

Key words. Methodology for choosing an effective decision strategy, decision support system, automation of decision support, general logic-probabilistic method, modeling, incompatible and joint events.

Polyakov Alexander Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Assoc., sansanich44@mail.ru, Russia, Sevastopol, the Black Sea Higher Military-Naval School named after P.S. Nakhimov.

Moiseev Dmitry Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Assoc., prof. Departments of ITICS, dvmoiseev@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Mashchenko Elena Nikolaevna, candidate of technical sciences, docent Professor, elmachenko@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

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

Аннотация. Электрическая сеть представляет сложную систему, состоящую из большого числа территориально распределенных элементов, таких как линии электропередачи, трансформаторы, подстанции, коммутационные аппараты, защитные устройства и т.д. В связи с глобальной цифровизацией и интеллектуализацией современного мира и ростом потребляемой электроэнергии, особо актуальной становится задача совершенствования электрических сетей. Интеллектуальные цифровые сети призваны решить эту задачу. С помощью новых технологий возможно модернизировать существующие сети (обычно устаревшие), что обеспечивает повышение надежности, отказоустойчивости, гибкости и эффективности системы электроснабжения, требуя меньших экономических затрат, чем полная замена сети. Интеллектуальные цифровые сети способны в автоматическом режиме изменять свои параметры и управлять оборудованием и элементами. Построена полумарковская модель участка распределительной сети цифрового учебного полигона СевГУ, представляющего из себя интеллектуальную сеть. Определяются стационарные характеристики надежности, рассматриваемого участка сети.

Ключевые слова. Электроэнергетическая система, распределительная сеть, интеллектуальная цифровая сеть, цифровой РЭС, полумарковская модель, стационарные характеристики надежности.

Введение. На данный момент существует большое количество материалов по тематике интеллектуальных сетей (Smart Grid). Среди них стоит отметить обзоры [1-3], научные публикации [4-7] и стандарты [8-13]. Согласно [14-16], цифровая сеть – совокупность объектов электрической сети, управление которыми осуществляется на базе цифровых технологий. Особенностью интеллектуальных цифровых сетей является способность сети в автоматическом режиме изменять свои параметры и управлять оборудованием и элементами. Преимуществом интеллектуальных сетей над теми, что существуют на данный момент, в первую очередь является повышение надёжности электроснабжения за счёт уменьшения времени, затрачиваемого на определение места повреждения и изменения топологии сети, для секционирования повреждённых участков для дальнейшего вывода их в ремонт, а также увеличение дохода путём снижения операционных затрат (ОРЕХ).

Согласно информации с источника [10], после модернизации сетей надёжность питания потребителей увеличивается в 3-10 раз, потери снижаются на 30-50%, CAPEX снижается на 20-30% за счёт ретрофита текущего оборудования. Цифровая трансформация электрических сетей включает в себя различные задачи, одной из которых является повышение надёжности и управляемости электрических сетей. Этого можно достичь, разрабатывая математические модели, учитывающие структуру и особенности функционирования электрических сетей.

Электроэнергетические системы состоят из большого количества взаимодействующих между собой элементов и обладают высокой степенью стохастичности. Каждый из этих элементов может случайным образом находиться в разных состояниях, влияющих на состояние всей системы. На этапе проектирования электроэнергетических систем важно определить показатели структурной надёжности [17-19] элементов. На практике для этого могут использоваться вероятностные модели, в частности, марковские и полумарковские модели [20-24]. Отметим, что полумарковские модели, в отличие от марковских моделей, помимо количественных характеристик надёжности, позволяют определять и временные характеристики.

Цифровой учебный полигон Севастопольского государственного университета представляет собой физическую модель участка интеллектуальной распределительной сети [10,25,26] нового поколения. Полигон выполнен в соответствии с идеологией компании “Plug and Play Engineering”, создателями проекта «Цифровой РЭС Крымэнерго», который реализован в Сакском районе в рамках Национальной технологической инициативы «Энерджинет». В учебном процессе полигон используется для получения практических навыков работы с оборудованием и управлением цифровой сетью.

Целью данной работы является построение полумарковской модели участка цифрового учебного полигона СевГУ и определение стационарных характеристик его надёжности. Рассматриваются два случая питания потребителей.

Описание системы. Рассматривается система S, состоящая из двух подходящих с разных сторон независимых источников питания и линий, (включающие в себя элементы воздушных линий и секционирующих аппаратов) объединённых в элементы И1 и И2, соответственно, двух отпаяк на трансформаторные подстанции (ТП) потребителей (схема на **Рис.1**), ограниченные от элементов Т1 и Т2 выключателями нагрузки (неавтоматическими делителями линии) производства Sarel, обозначенными элементами ЛВН1 и ЛВН2, а также реклоузера (РВА) производства Tavrida Electric, выступающим в данной схеме как автоматический ввод резерва (ABP) (см. **Рис.1**).

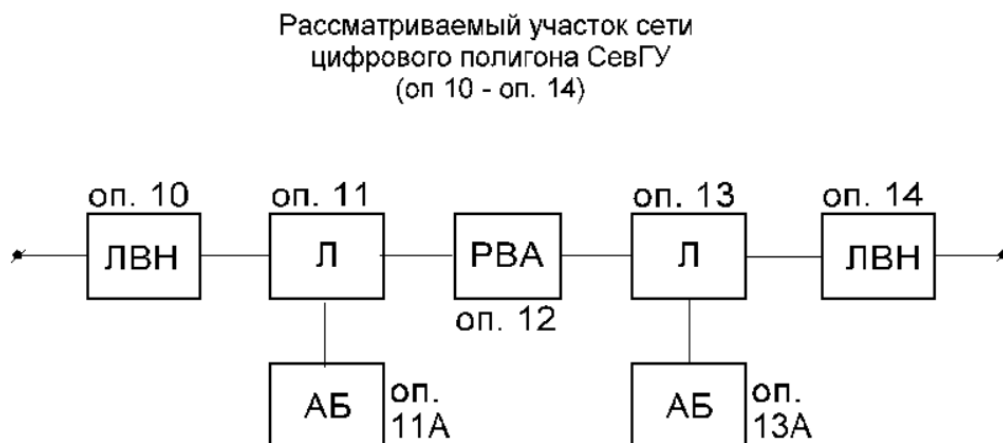


Рис.1 – Схема участка сети

В нормальном режиме работы исправны оба источника питания (И1, И2), а реклоузер РВА нормально разомкнут.

При аварии на одном из источников питания (Рис.2), или прилегающей к нему ЛЭП до ЛВН сначала происходит секционирование источника питания, далее размыкание контактов ближайшего ЛВН и замыкание контактов РВА. При аварии на любом из потребителей (Рис.2) – РВА остаётся разомкнутым, происходит отключение потребителя путем расплавления плавкого предохранителя с дальнейшим отключением прилегающего ЛВН, для вывода участка сети в ремонт. Стоит отметить, что каждый из потребителей является трансформаторным пунктом, состоящим из разъединителя, плавкого предохранителя и трансформатора на 160 КВА (Рис. 2).

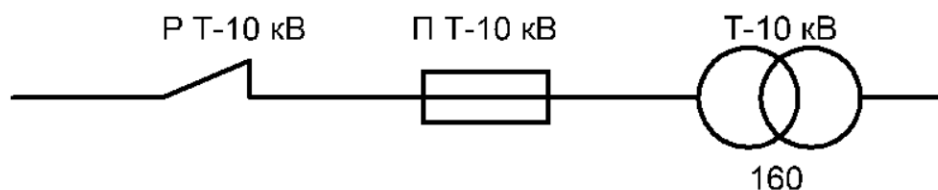


Рис.2 – Однолинейная схема ТП потребителя

Математической моделью рассматриваемой системы является суперпозиция двух альтернирующих процессов восстановления. Рассмотрим, следуя [20,21], систему S, состоящую из двух элементов. Физически элемент системы представляет собой участок от источника до РВА, включая отпайку на ТП потребителя. Каждый из элементов системы может находиться в двух состояниях: рабочем или на восстановлении. Времена безотказной работы элементов описываются случайными

величинами α_1 и α_2 , имеющими функции распределения $F_1(x) = P(\alpha_1 \leq x)$, $F_2(x) = P(\alpha_2 \leq x)$ и плотности распределения $f_1(x)$, $f_2(x)$, а время восстановления – случайными величинами β_1 и β_2 , имеющими функции распределения $G_1(x) = P(\beta_1 \leq x)$, $G_2(x) = P(\beta_2 \leq x)$ и плотности распределения $g_1(x)$, $g_2(x)$. Случайные величины α_1 , α_2 , β_1 , β_2 предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания.

Фазовое пространство состояний системы имеет вид:

$$E = \{0, 131x, 213x, 111x, 200x, 101x, 210x, 211x, 100x, 110x, 201x\} \quad (1)$$

Таблица 1. – Описание кодировки состояний

Код	Состояние рассматриваемого участка системы	Описание события
0	Нормальное состояние (старт работы)	И1, И2 без повреждений, АВР(РВА) разомкнут
131x	Аварийное состояние (авария на первом источнике)	Авария на И1 или участке от И1 до ЛВН1, ЛВН 1 разомкнут, АВР(РВА) замкнут
111x	Нормальное состояние (после устранения причин аварии)	И1, И2 без повреждений, АВР(РВА) разомкнут (состояние после ремонта и пуска И1)
213x	Аварийное состояние (авария на втором источнике)	Авария на И2 или участке от И2 до ЛВН 2, ЛВН 2 разомкнут, АВР(РВА) замкнут
211x	Нормальное состояние (после устранения причин аварии)	И1, И2 без повреждений, АВР(РВА) разомкнут (состояние после ремонта и пуска И2)
200x	Аварийное состояние (выход из строя питающих линий/ трансформаторов с обеих сторон)	И1 и И2 или линии на участке от И1 до ЛВН 1, ЛВН 1 и линии на участке от И2 до ЛВН 2, ЛВН 2 повреждены, П1, П2 без питания.
110x	Нормальное состояние системы (после восстановления)	Восстановлена подача питания на один из источников (Т1 или Т2), второй источник в ремонте, ближайший к неисправному источнику ЛВН разомкнут, АВР(РВА) замкнут

210х	Аварийное состояние (авария на линии или потребителе)	Авария на линии, прилегающей к И2, ЛВН2 отключен, АВР(РВА) разомкнут, П2 без питания.
100х	Аварийное состояние (выход из строя питающих линий/ трансформаторов с обоих сторон)	Авария на одном из источников питания (И1 или И2), авария на линии или потребителе (до НДЛ), прилегающей к исправному источнику
201х	Нормальное состояние (после устранения причин аварии)	Авария на линии, прилегающей к И1, восстановление питания от И2, АВР(РВА) замкнут, потребители П1 и П2 получают питание
101х	Аварийное состояние (авария на линии, прилегающей к потребителю)	Авария на линии, прилегающей к потребителю П1, ЛВН 1 разомкнут, АВР(РВА) разомкнут

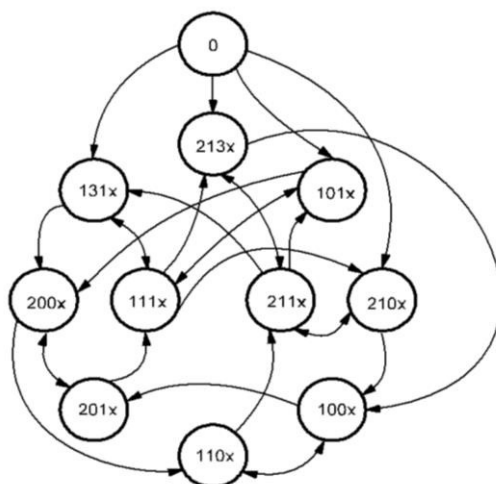


Рис.3 – Граф переходов состояний системы

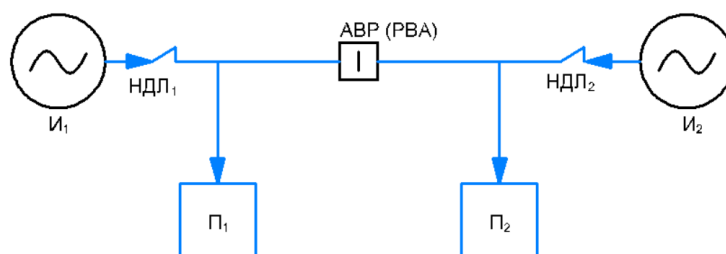


**Рис.4 – Нормальное состояние рассматриваемого участка сети
(состояние 0)**

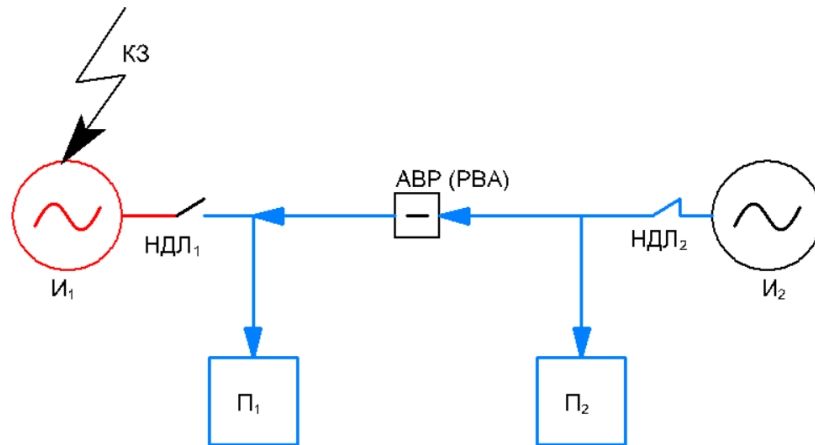


Рис.5 – Авария на источнике Т1 или линии от Т1 до НДЛ1 (состояние 131х)

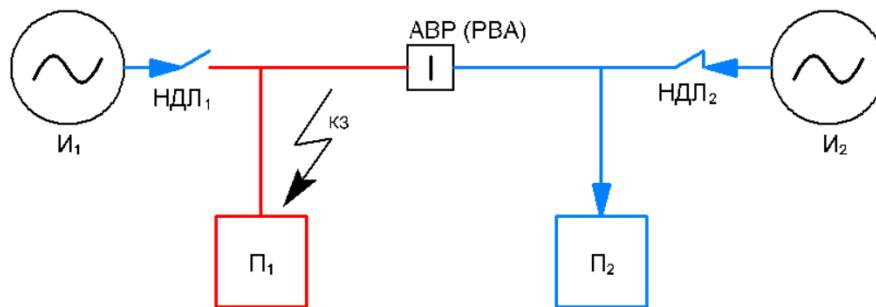


Рис.6 – Авария на потребителе Π_1 или линии, прилегающей к Π_1 (состояние 101х или 201х)

На **Рис.5-6** красным обозначены аварийные участки, а синим – участки под напряжением.

Построение полумарковской модели системы. Для описания функционирования системы S используем полумарковский процесс $\xi(t)$ [20-22] с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний (1). Непрерывная компонента x – время до следующего изменения состояния системы (время вперёд). Каждый элемент системы делится на два участка, на которых возможны аварии (**Рис.7**). Определим q_1 как вероятность того, что если случается авария, то она произошла на участке 1, т.е. источнике Т1 или линии от Т1 до ЛВН1. Соответственно, $(1 - q_1)$ – авария на участке 2: на потребителе Π_1 или линии, прилегающей к Π_1 . q_2 и $(1 - q_2)$ определяются аналогично.

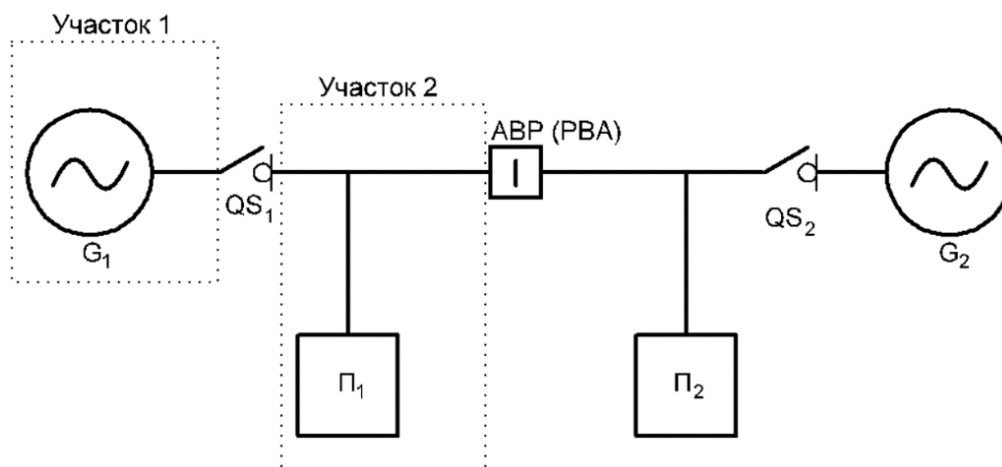


Рис.7 – Возможные участки аварии на первом элементе

Найдём вероятности переходов P_i^j между состояниями рассматриваемой системы:

$$P_0^{131x} = P\{\alpha_2 > \alpha_1\} = q_1 \int_0^{\infty} f_2(x+t) f_1(t) dt; \quad P_0^{213x} = q_2 \int_0^{\infty} f_1(x+t) f_2(t) dt;$$

$$P_0^{101x} = P\{\alpha_2 > \alpha_1\} = (1 - q_1) \int_0^{\infty} f_2(x+t) f_1(t) dt; \quad P_0^{210x} = (1 - q_2) \int_0^{\infty} f_1(x+t) f_2(t) dt; \quad (2)$$

$$P_{131x}^{111y} = q_1(x - y), 0 < y < x; \quad P_{131x}^{200y} = q_1(x + y), y > 0,$$

остальные P_i^j находятся аналогичным образом.

Система интегральных уравнений для нахождения стационарного распределения вложенной цепи Маркова имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \rho(131x) &= q_1 \int_x^\infty \rho(111y) f_1(y-x) dy + q_1 \int_0^\infty \rho(211y) f_2(y+x) dy + q_1 \rho(0) \int_0^\infty f_2(x+t) f_1(t) dt, \\
 \rho(213x) &= q_1 \int_0^\infty \rho(111y) f_1(y+x) dy + q_2 \int_x^\infty \rho(211y) f_2(y-x) dy + q_2 \rho(0) \int_0^\infty f_1(x+t) f_2(t) dt, \\
 \rho(111x) &= \int_x^\infty \rho(131y) g_1(y-x) dy + \int_x^\infty \rho(101y) g_1(y-x) dy + \int_0^\infty \rho(201y) f_2(x+y) dy, \\
 \rho(211x) &= \int_x^\infty \rho(213y) g_2(y-x) dy + \int_x^\infty \rho(210y) g_2(y-x) dy + \int_0^\infty \rho(110y) f_1(x+y) dy, \\
 \rho(101x) &= (1-q_1) \int_x^\infty \rho(111y) f_1(y-x) dy + (1-q_1) \int_0^\infty \rho(211y) f_2(y+x) dy + \\
 &\quad + (1-q_1) \rho(0) \int_0^\infty f_2(x+t) f_1(t) dt, \\
 \rho(210x) &= (1-q_2) \int_0^\infty \rho(111y) f_1(y+x) dy + (1-q_2) \int_x^\infty \rho(211y) f_2(y-x) dy + \\
 &\quad + (1-q_2) \rho(0) \int_0^\infty f_2(x+t) f_2(t) dt, \\
 \rho(110x) &= \int_0^\infty \rho(200y) g_2(y+x) dy + \int_x^\infty \rho(100y) g_1(y-x) dy, \\
 \rho(201x) &= \int_x^\infty \rho(200y) g_2(y-x) dy + \int_0^\infty \rho(100y) g_1(y+x) dy, \\
 \rho(100x) &= \int_0^\infty \rho(213y) g_2(y+x) dy + \int_0^\infty \rho(210y) g_2(y+x) dy + \int_x^\infty \rho(110y) f_1(y-x) dy, \\
 \rho(200x) &= \int_0^\infty \rho(131y) g_1(y+x) dy + \int_0^\infty \rho(101y) g_1(y+x) dy + \int_x^\infty \rho(201y) f_2(y-x) dy, \\
 &\quad + \text{условие нормировки.} \tag{3}
 \end{aligned}$$

Для решения системы (3) исключим из нее слагаемые, содержащие $\rho(0)$, и введём следующие замены:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1(x) &= \rho(111x), \varphi_2(x) = \rho(211x), \varphi_3(x) = \rho(131x), \varphi_4(x) = \rho(213x), \\
 \varphi_5(x) &= \rho(101x), \varphi_6(x) = \rho(210x), \varphi_7(x) = \rho(110x), \varphi_8(x) = \rho(201x), \\
 \varphi_9(x) &= \rho(100x), \varphi_{10}(x) = \rho(200x), \varphi_{11}(x) = \varphi_4(x) + \varphi_6(x), \varphi_{12}(x) = \varphi_3(x) + \varphi_5(x).
 \end{aligned}$$

Тогда система (3) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1(x) = \int_x^\infty \varphi_{12}(y) g_1(y-x) dy + \int_0^\infty \varphi_8(y) f_2(x+y) dy, \\ \varphi_2(x) = \int_x^\infty \varphi_{11}(y) g_2(y-x) dy + \int_0^\infty \varphi_7(y) f_1(x+y) dy, \\ \frac{\varphi_3(x)}{q_1} = \int_x^\infty \varphi_1(y) f_1(y-x) dy + \int_0^\infty \varphi_2(y) f_2(x+y) dy, \\ \frac{\varphi_4(x)}{q_2} = \int_0^\infty \varphi_1(y) f_1(y-x) dy + \int_x^\infty \varphi_2(y) f_2(y-x) dy, \\ \frac{\varphi_5(x)}{1-q_1} = \int_x^\infty \varphi_1(y) f_1(y-x) dy + \int_0^\infty \varphi_2(y) f_2(x+y) dy, \\ \frac{\varphi_6(x)}{1-q_2} = \int_0^\infty \varphi_1(y) f_1(y+x) dy + \int_x^\infty \varphi_2(y) f_2(y-x) dy, \\ \varphi_7(x) = \int_0^\infty \varphi_{10}(y) g_2(y+x) dy + \int_x^\infty \varphi_9(y) f_1(y-x) dy, \\ \varphi_8(x) = \int_x^\infty \varphi_{10}(y) g_2(y-x) dy + \int_0^\infty \varphi_9(y) g_1(y+x) dy, \\ \varphi_9(x) = \int_0^\infty \varphi_{11}(y) g_2(y+x) dy + \int_x^\infty \varphi_7(y) f_1(y-x) dy, \\ \varphi_{10}(x) = \int_0^\infty \varphi_{12}(y) g_1(y+x) dy + \int_x^\infty \varphi_8(y) f_2(y-x) dy. \end{array} \right. \quad (4)$$

Методом подстановки можно показать, что решение системы (4) определяется формулами:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= \rho_0 \bar{F}_2(x), \varphi_2(x) = \rho_0 \bar{F}_1(x), \varphi_3(x) = \rho_0 q_1 \bar{F}_2(x), \varphi_4(x) = \rho_0 q_2 \bar{F}_1(x), \\ \varphi_5(x) &= \rho_0 (1-q_1) \bar{F}_2(x), \varphi_6(x) = \rho_0 (1-q_2) \bar{F}_2(x), \varphi_7(x) = \rho_0 \bar{G}_2(x), \\ \varphi_8(x) &= \rho_0 \bar{G}_2(x), \varphi_9(x) = \rho_0 \bar{G}_1(x), \varphi_{10}(x) = \rho_0 \bar{G}_1(x), \varphi_{11}(x) = \rho_0 \bar{F}_1(x), \\ \varphi_{12}(x) &= \rho_0 \bar{F}_2(x), \end{aligned} \quad (5)$$

константа ρ_0 находится из условия нормировки.

Вычислим средние времена пребывания в состояниях ВЦМ:

$$\begin{aligned}
 131x:\theta_{131x} &= \beta_1 \wedge x, M_{131x} = \int_0^x \bar{G}_1(t) dt; & 213x:\theta_{213x} &= \beta_2 \wedge x, M_{213x} = \int_0^x \bar{G}_2(t) dt; \\
 111x:\theta_{111x} &= \alpha_1 \wedge x, M_{111x} = \int_0^x \bar{F}_1(t) dt; & 200x:\theta_{200x} &= \beta_2 \wedge x, M_{200x} = \int_0^x \bar{G}_2(t) dt; \\
 100x:\theta_{100x} &= \beta_1 \wedge x, M_{100x} = \int_0^x \bar{G}_1(t) dt; & 101x:\theta_{101x} &= \beta_1 \wedge x, M_{101x} = \int_0^x \bar{G}_1(t) dt; \\
 210x:\theta_{210x} &= \beta_2 \wedge x, M_{210x} = \int_0^x \bar{G}_2(t) dt; & 211x:\theta_{211x} &= \alpha_2 \wedge x, M_{211x} = \int_0^x \bar{F}_2(t) dt; \\
 110x:\theta_{110x} &= \alpha_1 \wedge x, M_{110x} = \int_0^x \bar{F}_1(t) dt; & 201x:\theta_{201x} &= \alpha_2 \wedge x, M_{201x} = \int_0^x \bar{F}_2(t) dt,
 \end{aligned} \quad (6)$$

где $\wedge$ — знак минимума.

Нахождение стационарных характеристик надежности. Определим среднее стационарное время безотказной работы T_+ , среднее стационарное время восстановления T_- и стационарный коэффициент готовности K_G для рассматриваемой системы по формулам [20]:

$$T_+ = \frac{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}{\int_{E_+} P(e, E_-) \rho(de)}, \quad T_- = \frac{\int_{E_-} m(e) \rho(de)}{\int_{E_+} P(e, E_-) \rho(de)}, \quad K_G = \frac{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}{\int_{E_+} m(e) \rho(de)} = \frac{T_+}{T_+ + T_-}. \quad (7)$$

Рассмотрим случай, когда хотя-бы один из потребителей получает электроэнергию, тогда

$$E_+ = \{131x, 213x, 111x, 101x, 210x, 211x, 110x, 201x\}, \quad E_- = \{200x, 100x\}.$$

В этом случае

$$\int_{E_+} m(e) \rho(de) = \rho_0 M \alpha_1 M \alpha_2 + \rho_0 M \beta_1 M \alpha_2 + \rho_0 M \beta_2 M \alpha_1,$$

$$\int_{E_-} m(e) \rho(de) = \rho_0 M \beta_1 M \beta_2,$$

$$\int_E m(e) \rho(de) = \rho_0 (M \alpha_1 + M \beta_1) (M \alpha_2 + M \beta_2),$$

$$\int_{E_+} P(e, E_-) \rho(de) = \rho_0 (M \beta_1 + M \beta_2).$$

Следовательно, используя формулы (7), получаем:

$$T_+ = \frac{M\alpha_1 M\alpha_2 + M\beta_1 M\alpha_2 + M\beta_2 M\alpha_1}{M\beta_1 + M\beta_2}, \quad T_- = \frac{M\beta_1 M\beta_2}{M\beta_1 + M\beta_2},$$

$$K_r = \frac{M\alpha_1 M\alpha_2 + M\beta_1 M\alpha_2 + M\beta_2 M\alpha_1}{(M\alpha_1 + M\beta_1)(M\alpha_2 + M\beta_2)}. \quad (8)$$

Отметим, что в этом случае стационарные характеристики надежности системы не зависят от того, на каком участке элемента произошла авария.

Теперь рассмотрим случай, когда оба потребителя получают электроэнергию, тогда:

$$E_+ = \{131x, 213x, 111x, 211x\}, \quad E_- = \{101x, 210x, 110x, 201x, 200x, 100x\}.$$

$$\int_{E_+} m(e) \rho(de) = \rho_0 \left[q_1 \int_0^\infty \overline{F_2}(x) dx \int_0^x \overline{G_1}(t) dt + q_2 \int_0^\infty \overline{F_1}(x) dx \int_0^x \overline{G_2}(t) dt + M\alpha_1 M\alpha_2 \right],$$

$$\int_{E_-} m(e) \rho(de) = \rho_0 \left[M\alpha_2 M\beta_1 + M\alpha_1 M\beta_2 + M\beta_1 M\beta_2 - q_1 \int_0^\infty \overline{F_2}(x) dx \int_0^x \overline{G_1}(t) dt - \right. \quad (9)$$

$$\left. - q_2 \int_0^\infty \overline{F_1}(x) dx \int_0^x \overline{G_2}(t) dt \right],$$

$$\int_{E_+} P(e, E_-) \rho(de) = \rho_0 \left[q_1 M(\alpha_2 \wedge \beta_1) + q_2 M(\alpha_1 \wedge \beta_2) + (1 - q_1) M\alpha_2 + (1 - q_2) M\alpha_1 \right].$$

$$T_+ = \frac{q_1 \int_0^\infty \overline{F_2}(x) dx \int_0^x \overline{G_1}(t) dt + q_2 \int_0^\infty \overline{F_1}(x) dx \int_0^x \overline{G_2}(t) dt + M\alpha_1 M\alpha_2}{q_1 M(\alpha_2 \wedge \beta_1) + q_2 M(\alpha_1 \wedge \beta_2) + (1 - q_1) M\alpha_2 + (1 - q_2) M\alpha_1}, \quad (10)$$

$$T_- = \frac{M\alpha_2 M\beta_1 + M\alpha_1 M\beta_2 + M\beta_1 M\beta_2 - q_1 \int_0^\infty \overline{F_2}(x) dx \int_0^x \overline{G_1}(t) dt - q_2 \int_0^\infty \overline{F_1}(x) dx \int_0^x \overline{G_2}(t) dt}{q_1 M(\alpha_2 \wedge \beta_1) + q_2 M(\alpha_1 \wedge \beta_2) + (1 - q_1) M\alpha_2 + (1 - q_2) M\alpha_1}, \quad (11)$$

$$K_r = \frac{q_1 \int_0^\infty \overline{F_2}(x) dx \int_0^x \overline{G_1}(t) dt + q_2 \int_0^\infty \overline{F_1}(x) dx \int_0^x \overline{G_2}(t) dt + M\alpha_1 M\alpha_2}{(M\alpha_1 + M\beta_1)(M\alpha_2 + M\beta_2)}, \quad (12)$$

$$\text{где } M(\alpha \wedge \beta) = \int_0^\infty \overline{F}(t) \overline{G}(t) dt.$$

В качестве иллюстративного примера использования формул (10) – (12), рассмотрим следующую систему. Предположим, что среднее время

безотказной работы первого элемента 1500 часов, второго – 1300 ч. Средние времена восстановления равны 30 ч. и 25 ч., соответственно. Рассмотрим случаи, когда $q_1=q_2$ и изменяются с шагом 10%. Результаты расчета стационарных характеристик надежности рассматриваемой системы представлены в **Таблице 2**.

Таблица 2. – Стационарные характеристики надежности системы

	Экспоненциальное распределение			Распределение Эрланга 5-го порядка		
	$T_+, \text{ч}$	$T_-, \text{ч}$	K_r	$T_+, \text{ч}$	$T_-, \text{ч}$	K_r
$q_1=q_2=0,1$	775,13	27,62	0,96559	775,12	27,60	0,96562
$q_1=q_2=0,2$	873,03	27,66	0,96929	873,00	27,60	0,96935
$q_1=q_2=0,3$	998,14	27,70	0,97299	998,07	27,61	0,97308
$q_1=q_2=0,4$	1163,64	27,77	0,97669	1163,48	27,62	0,97681
$q_1=q_2=0,5$	1392,83	27,85	0,98039	1392,50	27,64	0,98054
$q_1=q_2=0,6$	1731,25	27,98	0,98409	1730,57	27,67	0,98427
$q_1=q_2=0,7$	2281,43	28,19	0,98779	2279,92	27,71	0,98799
$q_1=q_2=0,8$	3332,62	28,59	0,99149	3328,59	27,79	0,99172
$q_1=q_2=0,9$	6141,16	29,66	0,99519	6124,51	27,99	0,99545

Несмотря на то, что в процессе цифровизации энергетики достигнуты некоторые успехи, остается еще очень много работы в данном направлении. Крупнейшие Российские и зарубежные энергетические компании разрабатывают планы и концепции цифровой трансформации на длительные сроки. Так как умные сети объединяют в себе различные области науки и техники, необходимо комплексно подходить к решению поставленных задач. Математическое моделирование элементов, участков и районов сетей позволяет оценивать и улучшать характеристики надежности и эффективности на этапе проектирования, что минимизирует затраты.

В данной работе построена полумарковская модель участка цифрового учебного полигона СевГУ и определены стационарные характеристики его надежности. Рассмотрены два случая питания потребителей. Приведен численный пример вычисления стационарных характеристик надежности.

Рассматриваемый участок сети является одним из типовым в идеологии модернизации распределительных сетей 6-35 кВ компании “Plug and Play Engineering”. Анализ характеристик его надежности позволит рассмотреть более сложную структуру сети, содержащую несколько подобных участков с различными связями между собой.

В дальнейшем авторы планируют построить полумарковскую модель всего учебного полигона СевГУ, проанализировать его характеристики надежности и эффективности. Это позволит использовать полученные результаты при проектировании реальных сетей в реализуемых проектах.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-329.2022.4.

Библиографический список

1. Fan D. Restoration of smart grids: Current status, challenges, and opportunities / D. Fan, Y. Ren, Q. Feng, Y. Liu, Z. Wang, J. Lin // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 143. – Art. No. 110909.
2. Guo C. Integrated energy systems of data centers and smart grids: State-of-the-art and future opportunities / C. Guo, F. Luo, Z. Cai, Z.Y. Dong // Applied Energy. – 2021. – Vol. 301. – Art. No. 117474.
3. Das L. Measuring smart grid resilience: Methods, challenges and opportunities / L. Das, S. Munikoti, B. Natarajan, B. Srinivasan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – 130. – Art. No. 109918.
4. Cardwell L. The Efficacy and Challenges of SCADA and Smart Grid Integration / L. Cardwell, A. Shebanow // J. Cyber Secur. Inf. Syst. – 2013. – Vol. 1. – P. 2–213.
5. Liu Y. The Influence of Smart Grid on Electric Power Automation. In: A Hassanien, K Shaalan, M Tolba (Eds.), Advances in Intelligent Systems and Computing 2019, Cham: Springer Nature Switzerland. – 2020. – Vol. 1058. – P. 1036-1043.
6. Huang G. System resilience enhancement: Smart grid and beyond / G. Huang, J. Wang, C. Chen, C. Guo, B. Zhu // Front. Eng. – 2017. – Vol. 4(3). – P. 271–282.
7. Noebels M. 2019 Assessing the Effect of Preventive Islanding on Power Grid Resilience / M. Noebels, M. Panteli // IEEE Milan PowerTech. – 2019. – P. 1-6.
8. STO 34.01-21-005-2019 Digital electrical network. Requirements for the design of digital distribution electrical networks 0.4 - 220 kV. PJSC Rosseti, 2019 [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_standart/doc/CTO_34.01-21-005-2019.pdf
9. Concept "Digital Transformation 2030", PJSC Rosseti, 2018 [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf

10. Implementation of a pilot project: Digital RES KrymEnergo"// Digital resource [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://en.ppt-online.org/912086>
11. National Technology Initiative: Russia's Leadership in Global Technology Markets by 2035 [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rvc.ru/pressservice/news/company/41396>
12. Roadmap "EnergyNet", 2016 [электронный ресурс]. Режим доступа: https://nti2035.ru/documents/docs/DK_energynet.pdf
13. Project "EnergyNet" 2016 [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://energynet.ru>
14. Chebotareva G. Digital transformation of the energy sector: A case of Russia / G. Chebotareva // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 250. – Art. No. 01001.
15. Park C. Study on the future sign detection in areas of academic interest related to the digitalization of the energy industry / C. Park, S. Cho, W. Heo // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 313. – Art. No. 127801.
16. Bakhtadze N. Digital Energy Ecosystems / N. Bakhtadze, B. Pavlov, V. Pyatetsky, A. Suleykin // IFAC-PapersOnLine. – 2019. – Vol. 52(13). – P. 30-35.
17. Brown R.E. Electric Power Distribution Reliability (2nd ed.) / R.E. Brown. – Boca Raton, CRC Press, 2008. – 504 p.
18. Rudenko Y.N. Reliability of Power Systems, 2nd eds. / Y.N. Rudenko, I.A. Ushakov. – Novosibirsk: Nauka, 1989. – 328 p.
19. Larkin E.V. Engineering method of fault -tolerant system simulations / E.V. Larkin, A.N. Privalov // Journal of Applied Engineering Science. – 2019. – Vol.17(3). – P. 295-303.
20. Korolyuk V.S. Markovian Restoration Processes in the Problems of System Reliability / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – Kiev: Nauk. Dumka, 1982. – 236 p.
21. Korolyuk V.S. Stochastic Models of Systems / V.S. Korolyuk, V.V. Korolyuk. – Dordrecht: Springer Science+Business Media, 1999. – 185 p.
22. Obzherin Y.E. Analysis of reliability and efficiency of electric power systems on the basis of semi-Markov models with common phase space of states / Y.E. Obzherin, M.M. Nikitin, S.M. Sidorov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – P. 631-641.
23. Tamura N. Structure of an optimal maintenance policy for a Semi-Markovian deteriorating system with major and minor failures / N. Tamura // Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM). – 2020. – P. 1-4.
24. Obzherin Y.E. 2018 Semi-Markov and hidden semi-Markov models of energy systems / Y.E. Obzherin // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 58. – Art. No. 02023.
25. Styczynski Z.A. of the reliability model of an active distribution electrical

- network / Z.A. Styczynski, N.I. Voropai, I.N. Shushpanov, K.V. Suslov // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2013. – Vol. 4 (75). – P. 167-171.
26. Shushpanov I.N. Towards the Flexible Distribution Networks Design Using the Reliability Performance Metric / I.N. Shushpanov, K.V. Suslov, P.V. Ilyushin, D.N. Sidorov // Energies. – 2021. – Vol. 14 (19). – Art. No. 6193.

Bibliograficheskiy spisok

1. Fan D. Restoration of smart grids: Current status, challenges, and opportunities / D. Fan, Y. Ren, Q. Feng, Y. Liu, Z. Wang, J. Lin // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 143. – Art. No. 110909.
2. Guo C. Integrated energy systems of data centers and smart grids: State-of-the-art and future opportunities / C. Guo, F. Luo, Z. Cai, Z.Y. Dong // Applied Energy. – 2021. – Vol. 301. – Art. No. 117474.
3. Das L. Measuring smart grid resilience: Methods, challenges and opportunities / L. Das, S. Munikoti, B. Natarajan, B. Srinivasan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – 130. – Art. No. 109918.
4. Cardwell L. The Efficacy and Challenges of SCADA and Smart Grid Integration / L. Cardwell, A. Shebanow // J. Cyber Secur. Inf. Syst. – 2013. – Vol. 1. – P. 2–213.
5. Liu Y. The Influence of Smart Grid on Electric Power Automation. In: A Hassanien, K Shaalan, M Tolba (Eds.), Advances in Intelligent Systems and Computing 2019, Cham: Springer Nature Switzerland. – 2020. – Vol. 1058. – P. 1036-1043.
6. Huang G. System resilience enhancement: Smart grid and beyond / G. Huang, J. Wang, C. Chen, C. Guo, B. Zhu // Front. Eng. – 2017. – Vol. 4(3). – P. 271–282.
7. Noebels M. 2019 Assessing the Effect of Preventive Islanding on Power Grid Resilience / M. Noebels, M. Panteli // IEEE Milan PowerTech. – 2019. – P. 1-6.
8. STO 34.01-21-005-2019 Digital electrical network. Requirements for the design of digital distribution electrical networks 0.4 - 220 kV. PJSC Rosseti, 2019 [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: https://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_standart/doc/CTO_34.01-21-005-2019.pdf
9. Concept "Digital Transformation 2030", PJSC Rosseti, 2018 [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf
10. Implementation of a pilot project: Digital RES KrymEnergo"// Digital resource [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: [Автоматизация и измерения в машино- приборостроении: научный журнал, 2022](https://en.ppt-</div><div data-bbox=)

-
- online.org/912086
11. National Technology Initiative: Russia's Leadership in Global Technology Markets by 2035 [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.rvc.ru/pressservice/news/company/41396>
 12. Roadmap “EnergyNet”, 2016 [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: https://nti2035.ru/documents/docs/DK_energynet.pdf
 13. Project “EnergyNet” 2016 [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://energynet.ru>
 14. Chebotareva G. Digital transformation of the energy sector: A case of Russia / G. Chebotareva // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 250. – Art. No. 01001.
 15. Park C. Study on the future sign detection in areas of academic interest related to the digitalization of the energy industry / C. Park, S. Cho, W. Heo // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 313. – Art. No. 127801.
 16. Bakhtadze N. Digital Energy Ecosystems / N. Bakhtadze, B. Pavlov, V. Pyatetsky, A. Suleykin // IFAC-PapersOnLine. – 2019. – Vol. 52(13). – P. 30-35.
 17. Brown R.E. Electric Power Distribution Reliability (2nd ed.) / R.E. Brown. – Boca Raton, CRC Press, 2008. – 504 p.
 18. Rudenko Y.N. Reliability of Power Systems, 2nd eds. / Y.N. Rudenko, I.A. Ushakov. – Novosibirsk: Nauka, 1989. – 328 p.
 19. Larkin E.V. Engineering method of fault -tolerant system simulations / E.V. Larkin, A.N. Privalov // Journal of Applied Engineering Science. – 2019. – Vol.17(3). – P. 295-303.
 20. Korolyuk V.S. Markovian Restoration Processes in the Problems of System Reliability / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – Kiev: Nauk. Dumka, 1982. – 236 p.
 21. Korolyuk V.S. Stochastic Models of Systems / V.S. Korolyuk, V.V. Korolyuk. – Dordrecht: Springer Science+Business Media, 1999. – 185 p.
 22. Obzherin Y.E. Analysis of reliability and efficiency of electric power systems on the basis of semi-Markov models with common phase space of states / Y.E. Obzherin, M.M. Nikitin, S.M. Sidorov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – P. 631-641.
 23. Tamura N. Structure of an optimal maintenance policy for a Semi-Markovian deteriorating system with major and minor failures / N. Tamura // Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM). – 2020. – P. 1-4.
 24. Obzherin Y.E. 2018 Semi-Markov and hidden semi-Markov models of energy systems / Y.E. Obzherin // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 58. – Art. No. 02023.
 25. Styczynski Z.A. of the reliability model of an active distribution electrical

network / Z.A. Styczynski, N.I. Voropai, I.N. Shushpanov, K.V. Suslov // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2013. – Vol. 4 (75). – P. 167-171.

26. Shushpanov I.N. Towards the Flexible Distribution Networks Design Using the Reliability Performance Metric / I.N. Shushpanov, K.V. Suslov, P.V. Ilyushin, D.N. Sidorov // Energies. – 2021. – Vol. 14 (19). – Art. No. 6193.

¹Сидоров Станислав Михайлович, к.т.н., доцент, xaevec@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Обжерин Юрий Евгеньевич, д.т.н., профессор, objsev@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Федоренко Сергей Николаевич, старший преподаватель, sergey.fedor@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

SEMI-MARKOV MODEL OF AN INTELLIGENT DISTRIBUTION NETWORK SECTION

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

The electrical network is a complex system consisting of a huge number of territorially distributed elements, such as power lines, transformers, substations, switching devices, protective devices, etc. In connection with the global digitalization and intellectualization of the modern world and the growth in electricity consumption, the task of improving electrical networks becomes especially relevant. Intelligent digital networks are designed to solve this problem. With the help of new technologies, it is possible to upgrade existing networks (usually obsolete), which provides an increase in the reliability, fault tolerance, flexibility and efficiency of the power supply system, requiring less economic costs than a complete replacement of the network. Intelligent digital networks are able to automatically change their parameters and control equipment and elements. In this article, a semi-Markov model of a section of the distribution network of the digital training ground of SevGU, which is an intelligent network, is built. The stationary reliability characteristics of the considered section of the network are determined.

Key words: electric power system, distribution network, intelligent digital network, digital RES, semi-Markov model, stationary reliability characteristics.

Sidorov Stanislav M., candidate of technical sciences, associate professor, xaevec@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

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

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

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАРКОВО – РЕКРЕАЦИОННЫХ ЗОН С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Доронина Ю.В.¹, Мустафаева М.И.²

Аннотация. В работе рассмотрены принципы формирования структуры и особенностей функционирования информационной системы поддержки транспортного обслуживания крупных пространственно распределенных, но единых с логистической точки зон на примере парково-рекреационной зоны. Предложены пути решения на основе применения беспилотных технологий нескольких типов: беспилотных летательных аппаратов и беспилотных транспортных средств. Предложенные решения позволили построить каркасную имитационную модель, получить оценки производительности базы данных в составе информационной системы поддержки транспортного обслуживания и обосновать пути развития предложенной модели.

Ключевые слова. транспортное обслуживание, информационная система поддержки, беспилотные транспортные средства, гибридная модель.

Введение

Проблемы транспортного обслуживания локальных городских зон (парково-рекреационных зон, крупных образовательных объектов, распределенных производственных строений, аэропортов и т.п.) обусловлены следующими факторами:

- ⇒ географическая однородность, но пространственная протяженность объекта транспортного обслуживания (ОТО);
- ⇒ разнотипные задачи: собственно, транспортное обслуживание (например, перевозка пассажиров в парковой зоне) и обеспечивающие процессы (например, контроль с воздуха процесса перевозки пассажиров; доставка медикаментов, мониторинг дорог и т.п.);
- ⇒ требования обеспечения безопасности жизнедеятельности на ОТО;
- ⇒ отсутствие возможности обеспечить нерегулярное пилотное транспортное обслуживание в связи с высокой стоимостью и другие [1-2].

Существующие исследования, касающиеся применения беспилотных транспортных средств на таких объектах, используют следующую

терминологию. Беспилотное наземное транспортное средство (БНТС) представляет собой транспортное средство, которое работает при контакте с землей и без бортового присутствия человека.

Термин беспилотное дорожное транспортное средство (БДТС), определяет беспилотное транспортное средство — механическое транспортное средство, оборудованное системой автоматического управления, которое может передвигаться без участия водителя. Это сокращение применено в Государственной думе РФ при обсуждении проекта закона о БДТС.

Поскольку термины БНТС, БДТС имеют широкую трактовку, а также в связи с тем, что, например, беспилотные летательные средства имеют свой устоявшийся термин – беспилотные летательные аппараты (БЛА) вместо терминов (в том числе более узких БНТС, БДТС) обычно применяется упрощенный термин – беспилотное транспортное средство (БТС), а в случае летательного аппарата – БЛА, **Рис.1** [3–5].



Рис. 1 –Классификация определений беспилотных средств

Готовые решения, например, уже используемые в Иннополисе (республика Татарстан, РФ) беспилотные такси, начали перевозить пассажиров с 2018 года, **Рис.2**. Автомобили забирают пассажиров в специальных местах — точках посадки. На старте таких точек было пять, сейчас — больше 20. Они равномерно распределены по городу [6].



Рис.2 – Беспилотное такси в Иннополисе [6]

Однако в этих транспортных перевозках не обеспечиваются приведенные выше задачи, например, оперативный мониторинг транспорта и дорог, что может быть эффективно решено на основе применения БЛА.

В комплексном решении гибридной системы: легкий БЛА и малый БТС важным компонентом является компьютерная система обеспечения консолидации и поддержания информационного взаимодействия этих средств.

Целью статьи является формулировка задач и принципов построения информационной системы поддержки транспортного обслуживания (ИСПТО) парково – рекреационных зон с применением беспилотных технологий, а также постановка задачи оптимизации производительности базы данных в составе ИСПТО, что позволит обосновать предложения по техническим решениям.

1. Особенности организации системы информационного обеспечения парково – рекреационных зон (ПРЗ)

Парк культуры и отдыха – природный и культурно-просветительский комплекс, который по размерам, размещению в плане населенного пункта и экологическим характеристикам позволяет обеспечивать условия для отдыха населения и проведения просветительских, культурно-массовых, физкультурно-оздоровительных мероприятий, организации игр и развлечений, создание условий для занятий художественным любительским творчеством. Для городских ПРЗ большое значение имеет функциональная и композиционная взаимосвязь с городским окружением [7-9].

Транспортное обслуживание при небольшой площади ПРЗ в большинстве случаев отсутствует, для больших площадей, применение БТС, оправдано, в том числе приведенными выше факторами. Наряду с БТС, применение легких мониторинговых БЛА придаст структурному решению законченность, фотосъемка объектов с БЛА имеет множество преимуществ по сравнению с получением данных с помощью, например, космических спутников. Основными предпосылками этих преимуществ являются оперативность получения фотоснимков, возможность съемки с небольших высот. Конечно, при фотосъемке с БЛА следует учитывать ряд

параметров, оказывающих влияние на последующую алгоритмическую обработку (высота съемки, скорость полета, скорость передвижения, дальность перехода и др.) [9].

В связи с ускорением цифровизации различных областей жизнедеятельности и развитием информационных систем, в том числе обеспечивающих поддержку транспортного обслуживания ПРЗ, которые дополняются БТС, БЛА, рассмотрим особенности таких информационных систем.

Обозначим следующие виды решаемых задач ИСПТО:

1. Поддержка решений транспортного обслуживания (хранение маршрутов, схемы движения, принятие решений об изменении маршрута и т.п.);
2. Организационные меры (хранение информации о диспетчерах, техническом персонале, управление задачами сотрудников и т.п.);
3. Мониторинг дорожных передвижений (оперативные карты, хранение измененных маршрутов, информация с датчиков БТС и т.п.);
4. Распознавание объектов и сравнение предметов на карте (детализованные карты, сбор и распознавание информации с БЛА, фиксация и тестирование объектов на пути);
5. Экологический мониторинг местности (дополнительные задачи БТС и БЛА);
6. Информация от клиентов (хранение информации, поступившей от клиентов на маршруте).

Таким образом, укрупненная схема информационной поддержки транспортного обслуживания с ИСПТО (без учета технических задач управления движением БЛА и БТС) приведена на **Рис.3**.

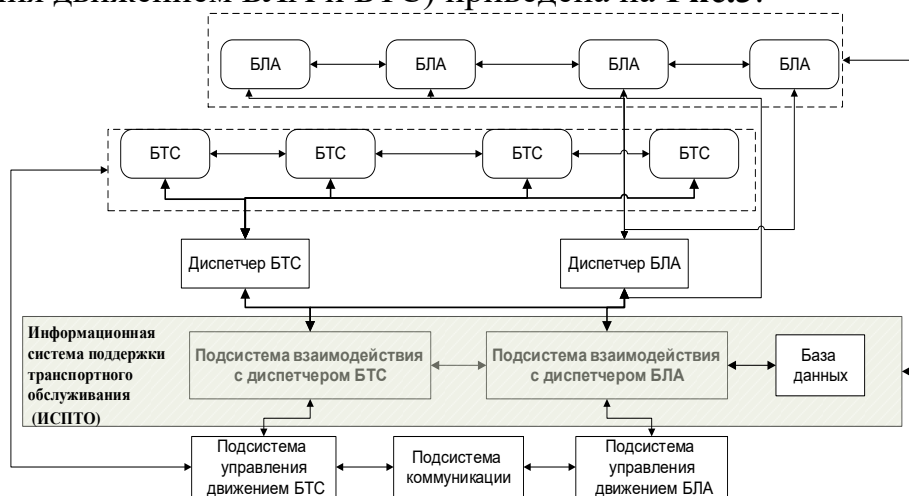


Рис.3 – Укрупненная схема информационной поддержки транспортного обслуживания ПРЗ

Как видно на **Рис.3**, ИСПТО имеет связи с техническим парком БЛА и БТС, диспетчерскими центрами и содержит в составе базу банных (БД), которая имеет структуру, схема фрагмента которой изображена на **Рис.4**.

Предложенная модель (**Рис.4**) содержит следующие сущности и их атрибуты: «оператор», «маршрут», «диспетчерский центр» (ДЦ), «беспилотное транспортное средство», «схема движений» и «текущий маршрут». Созданы таблицы с соответствующими связями и типами данных. В таблице «move_pattern» («схема движений») сформирован атрибут «объект» с типом данных blob, в данный атрибут будет загружается карта местности парковых зон.

Рассмотрим элементы требуемых операций для работы БД ИСПТО на основе операций SQL:

1. Формирование маршрутного движения (CREATE);
При построении способа доставки формируется маршрут.
2. Если повторный маршрут, то обязательно обновление БД. Если на каждый маршрут поступает новая задача, без повторных маршрутов, то обновление карт не происходит. Соответственно, строится новый маршрут, создается новый запрос к БД.
3. Экспорт маршрутного движения (EXPORT);
4. Загрузка маршрута;
 - а. Подпроцесс: валидация на целостность, безопасность;
5. Обновление карты (UPDATE);
 - а. Условие: если выполняется повторный маршрут.

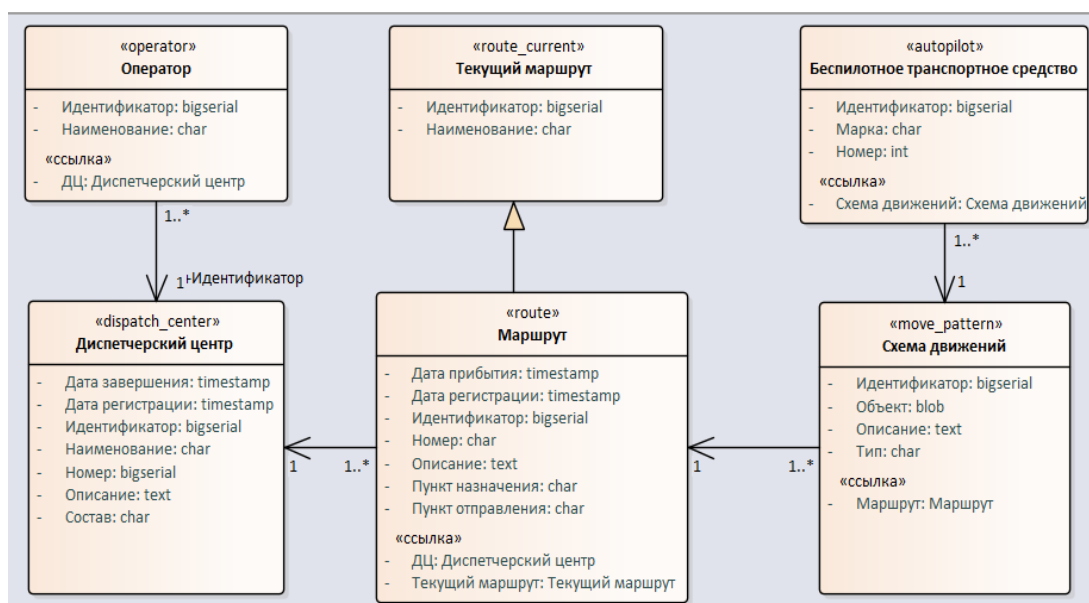


Рис.4 – Схема организации подсистемы базы данных информационной поддержки транспортного обслуживания ПРЗ

Задачи обеспечения целостности при критичности по отношению к нагрузке БД, приобретают особое значение, поскольку для формирования БД ИСПТО необходима загрузка, обновление карт, обмен оперативной информацией по каналам информационного обмена (КИО).

На основании практических рекомендаций о построении БД ИСПТО сформулируем задачу обеспечения эффективности выполнения ее функционала при условии наличия двух принципиально различных групп объектов обеспечения: БЛА и БТС.

2. Задача обеспечения эффективности выполнения функционала системы информационного обеспечения парково – рекреационных зон

Введем ряд обозначений, учитывающих наличие двух принципиально различных групп объектов обеспечения: БЛА и БТС:

- π – общая производительность БД, $\pi_{\min} \leq \pi_k \leq \pi_{\max}$, $k = \|K\|$, где $\pi_{\min}$, $\pi_{\max}$ – минимальная допустимая и максимальная возможная производительность БД в ИСПТО;
- $z_i^{BLA}, i = \overline{1, I}$ – задача по поддержке функционирования БЛА, сформулированная в форме запроса SQL из множества задач Z , $z_i^{BLA} \in Z$;
- $z_j^{BTC}, j = \overline{1, J}$ – задача по поддержке функционирования БТС, сформулированная в форме запроса SQL из множества задач Z , $z_j^{BTC} \in Z$;
- $z_q^{BLA} \cup z_q^{BTC} \subseteq Z$;
- $\tau_j^{BLA}, j = \overline{1, J}$ – период времени, в течение которого решается задача $z_i^{BLA} \in Z$;
- $\tau_0^{BLA} \leq \tau_j^{BLA} \leq \tau_{kr}^{BLA}$, где τ_0^{BLA} , τ_{kr}^{BLA} – начальный и критический (конечный) моменты времени реализации запроса SQL, учитывающие технические возможности аппарата БЛА;
- $\tau_w^{BTC}, w = \overline{1, W}$ – период времени, в течение которого решается задача $z_j^{BTC} \in Z$;
- $\tau_0^{BTC} \leq \tau_q^{BTC} \leq \tau_{kr}^{BTC}$, где τ_0^{BTC} , τ_{kr}^{BTC} – начальный и критический (конечный) моменты времени реализации запроса SQL, учитывающие технические возможности аппарата БТС [11].

Кроме того, учитывая введенные ранее положения об особенностях применения специальных типов запросов, таких как экспорт маршрутного движения (EXPORT) и обновление карт (UPDATE), целесообразно учесть их отдельно:

$$\begin{aligned} & z_{i_1}^{BLA(EXPORT)}, z_{j_1}^{BTC(EXPORT)}; \tau_{i_1}^{BLA(EXPORT)}, i_1 = \overline{1, I_1}, \tau_{j_1}^{BTC(EXPORT)}, j_1 = \overline{1, J_1}; \\ & z_{i_2}^{BLA(UPDATE)}, z_{j_2}^{BTC(UPDATE)}; \tau_{i_2}^{BLA(UPDATE)}, i_2 = \overline{1, I_2}, \tau_{j_2}^{BTC(UPDATE)}, j_2 = \overline{1, J_2}; \\ & \left(z_{i_1}^{BLA(EXPORT)} \cup z_{j_1}^{BTC(UPDATE)} \right) \cup \left(z_{i_1}^{BLA(UPDATE)} \cup z_{j_1}^{BTC(EXPORT)} \right) \subseteq Z; \end{aligned}$$

$$\tau_{j_1}^{BTC(EXPORT)} + \tau_{j_2}^{BTC(UPDATE)} < \tau_{kr}^{BTC}; \tau_{i_1}^{BLA(EXPORT)} + \tau_{i_2}^{BLA(UPDATE)} < \tau_{kr}^{BLA}.$$

Тогда производительность БД ИСПТО в общем случае определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \pi_{\tau_i^{BLA}}^{z_i^{BLA}} = F\left[\left(z_i^{BLA(EXPORT)}, z_i^{BLA(UPDATE)}, z_i^{BLA(\square)}\right), t_i^{BLA}, r_i^{BLA}(t_i), \mu, V, \gamma^{BLA}(t_i), \xi_i\right], \\ \pi_{\tau_j^{BTC}}^{z_j^{BTC}} = Q\left[\left(z_j^{BTC(EXPORT)}, z_j^{BTC(UPDATE)}, z_j^{BTC(\square)}\right), t_j^{BTC}, r_j^{BTC}(t_j), \mu, V, \gamma^{BTC}(t_j), \xi_j\right], \end{cases} \quad (1)$$

где $r^{BLA}(t_i), r^{BTC}(t_i)$ – ресурсы или определенный ресурс, который наибольшим образом влияет на производительность БД ИСПТО, например, объем оперативной памяти и т.п.), в момент времени t_i , причем $r_{\min}^{BLA}(t_i) \leq r^{BLA}(t_i) \leq r_{\max}^{BLA}(t_i); r_{\min}^{BTC}(t_i) \leq r^{BTC}(t_i) \leq r_{\max}^{BTC}(t_i)$.

μ – коэффициент, отражающий сложность БД (число таблиц, типы связей и т.п.), $0 \leq \mu \leq 1$;

V – число записей БД, $V \leq V^{kr}$ (V^{kr} – критический объем БД, при котором решение задачи из множества Z в заданное время $\tau_j, j = \overline{1, J}$ не может быть обеспечено);

$\gamma^{BLA}(t_i), \gamma^{BTC}(t_i)$ – средние интенсивности запросов по разным типам устройств соответственно в момент времени t_i ;

ξ – случайный параметр, отражающий возможную неопределенность при оценивании производительности БД, $0 \leq \xi \leq 1$.

Ставится задача минимизации времени, в течении которого осуществится поддержка транспортного обслуживания ПРЗ с учетом наличия двух принципиально различных групп объектов обеспечения: БЛА и БТС:

$$\begin{aligned} \tau_i^{BLA}(t_i) &= \arg \min_{\tau_i^{BLA}(t_i) \in T} (\pi_{\tau_i^{BLA}}^{z_i^{BLA}}, r_i^{BLA}(t_{i-1})) \\ \tau_j^{BTC}(t_j) &= \arg \min_{\tau_j^{BTC}(t_j) \in T} (\pi_{\tau_j^{BTC}}^{z_j^{BTC}}, r_j^{BTC}(t_{j-1})) \end{aligned} \quad (2)$$

при условиях:

$$\begin{aligned} r_{\min}^{BLA}(t_i) \leq r^{BLA}(t_i) \leq r_{\max}^{BLA}(t_i), r_{\min}^{BTC}(t_j) \leq r^{BTC}(t_j) \leq r_{\max}^{BTC}(t_j); \\ V_{\min} \leq V_{\tau_i}^{z_i} \leq V^{kr}; \mu_{\min} \leq \mu \leq 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Условия (3) формулируют ограничения на критические значения времени τ_i , ресурсов $r(t_i)$, объем БД (число записей) $V_{\tau_i}^{z_i}$ и сложности БД (число таблиц, типы связей и т.п.) для производственной БД и определяются конкретными задачами и особенностями проектирования

высоконагруженной БД. Параметры $\mu_{\min}$, $V_{\min}$ и $r_{\min}(t_i)$ определяют минимальную избыточность схемы БД при нормализации, относительно задач, касающихся конкретных технических устройств БЛА или БТС.

Поскольку рассматриваемые в статье оценки времени реализации задач БД ИСПТО описываются векторными критериальными оценками, то для поддержки принятия решений по определению оптимальных режимов ее работы в многокритериальном пространстве, необходимо формировать множество решений, например, на основе Парето-подхода, оставляя выбор конкретного решения за ЛПР.

На основе созданного тестового примера проведем оценивание длительности решения задач поддержки транспортного обслуживания некоторой ПРЗ с целью формирования принципов принятия решений по повышению производительности БД ИСПТО.

3. Результаты моделирования эффективности выполнения функционала системы информационного обеспечения парково – рекреационной зоны

Рассмотрим возможную схему формирования транспортного обслуживания в парково – рекреационной зоне «Парк Победы», город Севастополь, на основе беспилотных технологий. Спутниковая карта ПРЗ Парка Победы г. Севастополь с возможной примерной компоновкой транспортных узлов и ДЦ приведена на **Рис.5**. Расположение пунктов транспортного обслуживания в данной зоне является условной проектной в связи с незаконченными проектными работами по реконструкции Парка Победы.

Преимуществом использования беспилотных технологий в этой ПРЗ является возможность БЛА оперативного распознавания препятствий до момента достижения этого препятствия БТС; позволяют контролировать неблагоприятные погодные условия, например, сильный дождь, интенсивный туман, снег; непредвиденные остановки; требования пассажиров и т.п.

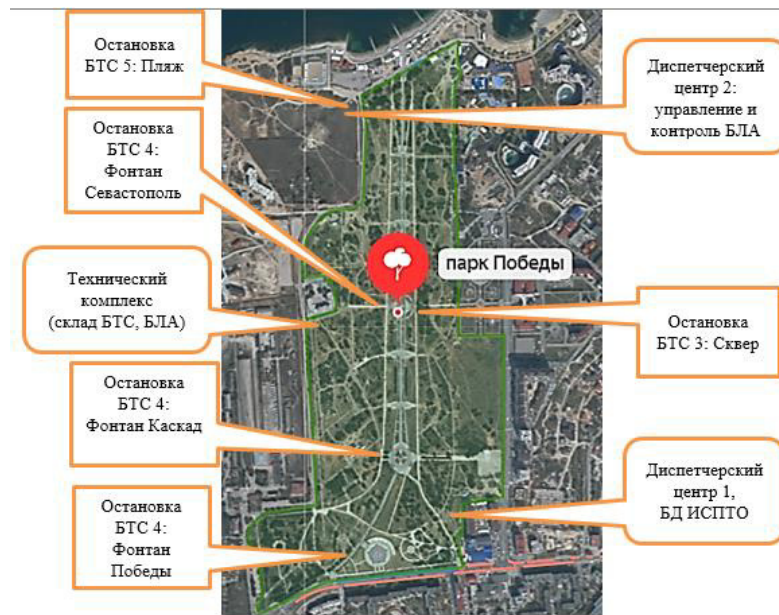


Рис.5 – Спутниковая карта ПРЗ «Парк Победы» г. Севастополь

В таблице 1. приведены результаты моделирования длительности реакции ИСПТО на выполнение задач поддержки при двух режимах работы: интенсивная нагрузка БД; обычная нагрузка БД при коэффициенте сложности $\mu = 0,8$. Моделирование производилось на платформе AnyLogic в предположении о нормальном законе распределения случайной величины интенсивности поступления задач на вход ИСПТО.

Математические ожидания производительности БД $\pi_{\tau_j^{BTC}}^{z_j^{BTC}}$ при реализации запросов SQL EXPORT и UPDATE равны соответственно: 0,738 и 0,658; и дисперсии 0,0045 и 0,0095; $\pi_{\tau_i^{BLA}}^{z_i^{BLA}}$ эти оценки равны соответственно: 0,838 и 0,76; дисперсии 0,0015 и 0,0045, таблица 1.

Таблица 1 – Оценки производительности БД ИСПТО

Число записей БД, ν	$r_i^{BLA}(t_{i-1})$	$r_j^{BTC}(t_{i-1})$	$\pi_{\tau_i^{BLA}}^{z_i^{BLA}}$		$\pi_{\tau_j^{BTC}}^{z_j^{BTC}}$	
			EXPORT	UPDATE	EXPORT	UPDATE
100	0,93	0,85	0,90	0,77	0,80	0,76
200	0,93	0,85	0,85	0,79	0,80	0,76
300	0,93	0,85	0,82	0,76	0,70	0,63
400	0,93	0,85	0,82	0,74	0,70	0,59
500	0,93	0,85	0,80	0,74	0,65	0,55

Можно видеть, что с ростом числа записей в БД производительность БД падает в среднем на 9,8%. Заметны отличия в производительности БД при поддержке БЛА или БТС: так, при реализации запроса на обновление карт среднее изменение скорости информации от БЛА выше среднего изменения скорости обновления от БТС в 7 раз (при увеличении объема записей БД в 5 раз со 100 до 500 условных записей).

Принятие решений по многокритериальной схеме может быть получено на основе Парето-подхода. На **Рис.6** приведены схемы критериального пространства выбора решений ЛПР для БЛА и БТС.

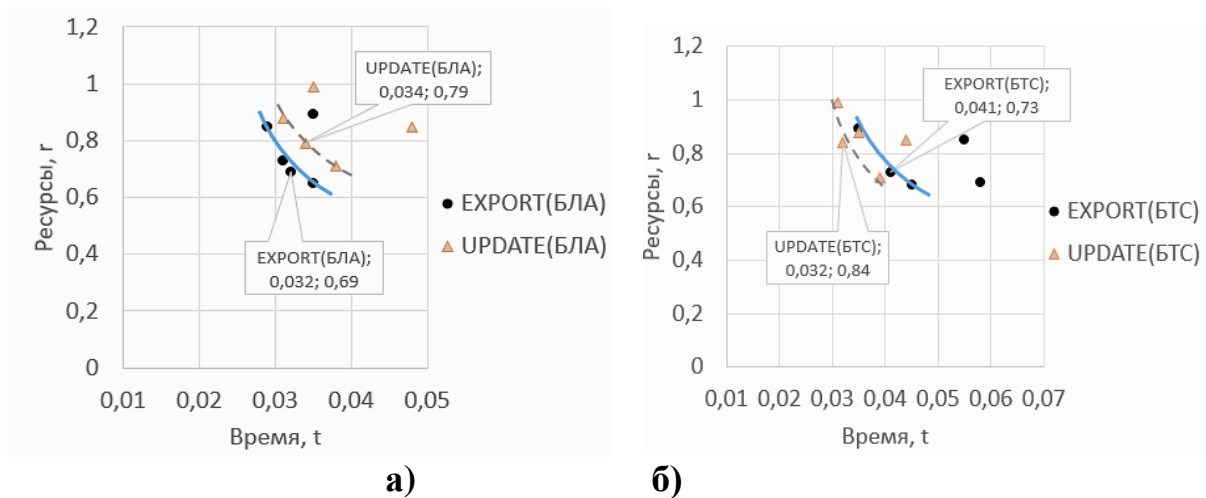


Рис.6 – Критериальное пространство выбора решений ЛПР для двух типов технологий: а) БЛА; б) БТС

Приведенные решения на основе Парето-подхода позволили увидеть следующие закономерности: для БЛА поддержка операций EXPORT имеют лучшие показатели по скорости реализации, чем по операции UPDATE, тогда как для БТС имеется обратная тенденция. В развитии исследований предполагается уточнить полученные решения за счет увеличения объемов выборок имитационных моделей и учесть особенности технологий КИО.

Заключение. В ходе исследования оценено влияние вида запросов SQL EXPORT и UPDATE на производительность БД в целом, предложена формальная постановка задачи оптимизации производительности такой БД. На основе предложенной конфигурации структуры технического обеспечения транспортного обслуживания и гетерогенной структуры построена имитационная модель и показано, что для $\nu = 500$ (число записей БД) среднее изменение скорости информации от БЛА выше среднего изменения скорости обновления от БТС в 7 раз. Дальнейшие исследования авторов предполагаются в направлении уточнения структуры системы диспетчерских центров транспортного обслуживания ПРЗ и реализация

СППР, которая позволит формировать решения в реальных условиях планирования процессов, в том числе, связанные с каналами информационного обмена технических средств.

Библиографический список

1. Степанян А.Ж. Проблемы регулирования беспилотных транспортных средств / А.Ж. Степанян // Вестник университета имени О.Е. Кутафина. – 2019. – №. 4 (56). – С. 169-174.
2. Федосеева Н.А. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов / Н.А. Федосеева, М.В. Загвоздкин // Научный журнал. – 2017. – №9 (22).
3. Скатков А.В. Адаптивное обнаружение уязвимостей интерфейсов беспилотных транспортных средств / А.В. Скатков, А.А. Брюховецкий, Ю.В. Доронина. – Симферополь: ООО Из-во типография «Ариал», 2020. – 352с.
4. Коробеев А.И. Беспилотные транспортные средства: новые вызовы общественной безопасности / А.И. Коробеев, А.И. Чучаев // Lex Russica. – 2019. – №2 (147). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-transportnye-sredstva-novye-vyzovy-obshchestvennoy-bezopasnosti>
5. 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>
6. Беспилотное такси в Иннополисе: цифры и факты [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yandex.ru/blog/company/bespilotnoe-taksi-v-innopolise-tsifry-i-fakty>
7. Буданцева М.В. Актуальность реализации рекреационного потенциала парков культуры и отдыха в социализации детей / М.В. Буданцева, Н.Н. Иванова // Социально-экономические явления и процессы. – 2014. – Т. 9. – №. 12. – С. 361-365.
8. Доронина, Ю.В. Классификация требований при создании системы мониторинга каналов информационного обмена / Ю.В. Доронина // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2021. – № 4(16). – С. 38-49. – EDN WEWWAS.
9. Белл Ч. Обеспечение высокой доступности систем на основе MySQL / Ч. Белл, М. Киндал, Л. Талманн // Русская редакция, БХВ. С.Петербург. 2012. – 624 с.
10. Щипцова А.В. Поиск, анализ и оптимизация длительных запросов к базе данных / А.В. Щипцова, М.Ю. Казначеева // Состояние и перспективы развития ИТ-образования. – 2018. – С. 277-285.

11. Доронина Ю. В. Система поддержки принятия решений по повышению производительности прикладных высоконагруженных баз данных / Ю.В. Доронина, М.И. Мустафаева // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2022. – №1(17). – С. 56-70.

Bibliograficheskij spisok

1. Stepanyan A.ZH. Problemy regulirovaniya bespilotnyh transportnyh sredstv / A.ZH. Stepanyan // Vestnik universiteta imeni O.E. Kutafina. – 2019. – №. 4 (56). – S. 169-174.
2. Fedoseeva N.A. Perspektivnye oblasti primeneniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov / N.A. Fedoseeva, M.V. Zagvozdkin // Nauchnyj zhurnal. – 2017. – №9 (22).
3. Skatkov A.V. Adaptivnoe obnaruzhenie uyazvimostej interfejsov bespilotnyh transportnyh sredstv / A.V. Skatkov, A.A. Bryuhoveckij, YU.V. Doronina. – Simferopol': OOO Iz-vo tipografiya «Arial», 2020 – 352s.
4. Korobeev A.I. Bespilotnye transportnye sredstva: novye vyzovy obshchestvennoj bezopasnosti / A.I. Korobeev, A.I. CHuchaev // Lex Russica. – 2019. – №2 (147). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-transportnye-sredstva-novye-vyzovy-obshchestvennoj-bezopasnosti>
5. 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>
6. Bespilotnoe taksi v Innopolise: cifry i fakty [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://yandex.ru/blog/company/bespilotnoe-taksi-v-innopolise-tsifry-i-fakty>
7. Budanceva M.V. Aktual'nost' realizacii rekreacionnogo potenciala parkov kul'tury i otdyha v socializacii detej / M.V. Budanceva, N.N. Ivanova // Social'no-ekonomicheskie yavleniya i processy. – 2014. – T. 9. – №. 12. – S. 361-365.
8. Doronina, YU.V. Klassifikaciya trebovanij pri sozdanii sistemy monitoringa kanalov informacionnogo obmena / YU.V. Doronina // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2021. – № 4(16). – S. 38-49. – EDN WEWWAS.
9. Bell CH. Obespechenie vysokoj dostupnosti sistem na osnove MySQL / CH. Bell, M. Kindal, L. Talmann // Russkaya redakciya, BHV. S.Peterburg. 2012. – 624 s.
10. SHCHipcova A.V. Poisk, analiz i optimizaciya dlitel'nyh zaprosov k baze dannyh / A.V. SHCHipcova, M.YU. Kaznacheeva // Sostoyanie i perspektivy razvitiya IT-obrazovaniya. – 2018. – S. 277-285.

-
11. Doronina YU. V. Sistema podderzhki prinyatiya reshenij po povysheniyu proizvoditel'nosti prikladnyh vysokonagruzhennyh baz dannyh / YU.V. Doronina, M.I. Mustafaeva // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii. 2022. – №1(17). – S. 56-70.

¹Доронина Юлия Валентиновна, д.т.н., доцент, YVDoronina@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Мустафаева Мерьем Ибраимовна, аспирант, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

**INFORMATION SYSTEM FOR SUPPORT OF TRANSPORT SERVICES
OF PARK AND RECREATION AREAS WITH THE USE OF UNMANNED
TECHNOLOGIES**

Yu.V. Doronina, M.I. Mustafaeva

Annotation. The paper considers the principles of the formation of the structure and features of the functioning of the information system for the support of transport services of large spatially distributed, but unified from a logistical point of view zones on the example of a park and recreation zone. Solutions based on the use of unmanned technologies of several types are proposed: unmanned aerial vehicles and unmanned vehicles. The proposed solutions made it possible to build a frame simulation model, to obtain estimates of the database performance as part of the transport service support information system and to justify the ways of development of the proposed model.

Keywords: transport services, information support system, unmanned vehicles, hybrid model.

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

Mustafaeva Meriem Ibraimovna, post-graduate student, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ОБРАБОТКИ ПАРТИЙ В МЕЛКОСЕРИЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Кротов К.В.

Аннотация. Задачи оптимизации расписаний обработки партий деталей в мелкосерийных производствах являются неразрешимыми за ограниченное время. В связи с этим актуальна разработка новых подходов для решения указанных задач большой размерности. В то же время практические потребности обуславливают необходимость учета особенностей производственных процессов обработки партий, связанных с формированием комплектов и заданием ограничений на длительности интервалов времени функционирования обрабатывающих систем.

В работе развивается иерархический подход к математическому моделированию процессов обработки партий деталей в мелкосерийных производствах, что позволило синтезировать модели этих процессов, используемые при решении различных задач оптимизации расписаний. Развита иерархическая модель оптимизации расписаний обработки партий, что позволило сформировать математические модели иерархических игр для решения различных задач управления производственными процессами, с учетом особенностей, связанных с формированием комплектов и ограничениями на ресурсы обрабатывающих систем.

Ключевые слова. Гибкая производственная система, партии деталей, расписания, комплекты, ограничения на ресурсы, иерархические модели производственных процессов, модели иерархических игр оптимизации расписаний.

Введение. Функционирование мелкосерийных механообрабатывающих производств обеспечивает выпуск деталей разных типов в соответствии с поступающими заказами. Управление процессами в мелкосерийных механообрабатывающих производствах направлено на повышение эффективности функционирования обрабатывающих систем, эффективности использования их ресурсов (ресурсов обрабатывающих приборов, входящих в эти системы). Для управления производственными процессами указанного вида задействуются следующие системы: 1) автоматизированные системы управления предприятием – АСУП (АСП-системы) – реализующие формирование заданий на выпуск деталей, комплектов деталей (узловых комплектов, машинокомплектов и т.д.) для имеющихся производственных мощностей предприятий в соответствии с поступившими заказами; 2) автоматизированные системы управления технологическими процессами – АСУТП (MES-системы) – реализующие

формирование планов-графиков (расписаний) загрузки обрабатывающего оборудования выпуском деталей соответствующих типов.

Таким образом, АСУП (ASP-системы) реализуют распределение заданий на выпуск деталей (комплектов деталей), сформированных в соответствии с заказами, по цехам, которые должны быть выполнены к заданным для них директивным срокам (формируют планы-графики выпуска деталей), а АСУТП (MES-системы) в соответствии с планом-графиком выпуска деталей формируют расписания загрузки оборудования выполнением операций по обработке этих деталей (формируют планы-графики загрузки оборудования обработкой деталей). Таким образом, MES-системы реализуют планирование производственных процессов с целью управления ими при выполнении обработки деталей на оборудовании (реализуют оперативно-календарное планирование). Под управлением производственными процессами здесь подразумеваются воздействия на технологическое оборудование рабочих мест с целью выполнения технологического цикла обработки. Рабочими местами, на которых реализуется обработка деталей, выступают гибкие технологические места (ГТМ), объединенные в гибкую производственную систему (ГПС) потокового типа. В этом случае выполнение заданий по обработке деталей в соответствии с заказами реализуется в составе конвейерных систем (КС).

Под моделью производственного процесса подразумевается способ формализации перемещения и преобразования ресурсов в продукцию на обрабатывающих приборах (ГТМ) конвейерных систем в течение времени. Управление процессами в мелкосерийных производствах обеспечивается пространственно-временным их моделированием. Пространственно-временной моделью производственного процесса является расписание выполнения операций по обработке деталей на ГТМ, входящих в состав ГПС конвейерного типа. Под управлением производственными процессами обработки деталей подразумевается в этом случае активизация выполнения операций с ними (с партиями) на приборах ГПС конвейерного типа в соответствии с сформированным расписанием.

Типизация деталей, обрабатываемых на приборах ГПС, реализуется в соответствии со следующими параметрами: 1) длительности обработки деталей на приборах ГПС; 2) длительности переналадки приборов на обработку деталей соответствующих типов (длительности подготовительно-заключительных периодов обработки деталей). В этом случае деталям одного типа соответствуют равные значения введенных параметров. Эффективное использование ресурсов приборов ГПС и снижение длительности производственного цикла при мелкосерийной обработке деталей разных типов обеспечивается формированием партий деталей одного типа, составы которых оптимизируются. В этом случае под

партией подразумевается группа деталей одного типа, выполняемая на приборах КС без их переналадки на обработку деталей других типов.

Управление процессами в мелкосерийных механообрабатывающих производствах обеспечивается пространственно-временным моделированием обработки партий деталей разных типов на приборах конвейерных систем, а также оптимизацией решений по составам партий деталей и расписаниям их обработки в КС. При этом моделирование производственных процессов обработки партий деталей, оптимизация составов партий и расписаний их обработки являются двумя совместно решаемыми задачами, обеспечивающими управление этими процессами в ГПС.

Используемыми в настоящее время методами оптимизации составов партий и расписаний их выполнения, а также соответствующими им методами моделирования процессов в мелкосерийных производствах, являются:

1) целочисленное программирование, позволяющее получать решения рассматриваемых задач при ограниченной их размерности (задачи являются NP-трудными [1], решение реальных производственных задач, связанных с широкой номенклатурой обрабатываемых деталей, значительным количеством приборов с использованием этого аппарата невозможно);

2) методы оптимизации составов партий и расписаний их выполнения с учетом директивных сроков окончаний обработки деталей (данный способ не предполагает учета временных параметров процесса обработки деталей);

3) метаэвристические алгоритмы (в частности, генетические алгоритмы), не гарантирующие получение эффективных решений при различных значениях входных данных для задач оптимизации;

4) эвристические правила, позволяющие получать решения по составам партий и расписаниям их выполнения на приборах конвейерных систем, но не предусматривающие их оптимизацию с целью улучшения решений.

Таким образом, разработка новых подходов к математическому моделированию и управлению процессами обработки партий деталей в мелкосерийных производствах является актуальной и обуславливается необходимостью значительного увеличения размерности решаемых задач, необходимостью учета при оптимизации составов партий временных параметров производственных процессов обработки, необходимостью учета особенностей этих процессов, связанных с формированием

комплектов обработанных деталей и заданием ограничений на длительности интервалов времени функционирования КС.

Математическое моделирование производственных процессов обработки партий деталей в конвейерных системах и оптимизация решений по составам партий и расписаниям их обработки.

В основу решения задач математического моделирования процессов обработки партий деталей в мелкосерийных производствах и управления этими процессами, предусматривающего оптимизацию решений по составам партий и расписаниям их выполнения, положен иерархический подход и декомпозиция обобщенной функции системы на совокупность иерархически упорядоченных подфункций ([2]), каждая из которых реализуется на соответствующем ей уровне иерархии системы моделирования и оптимизации решений.

При выделении (в результате декомпозиции) подфункций в обобщенной функции системы имеют место следующие свойства иерархических систем ([2]: 1) очередность формирования решений; 2) необходимость передачи сформированных решений с одного уровня на другой; 3) зависимость степени оптимальности решения на вышестоящем уровне от лучшего решения с нижестоящего уровня; 4) реализация обобщенной функции системы возможно при реализации ее внутренних подфункций на каждом уровне.

В качестве базовой задачи моделирования и управления процессами в мелкосерийных механообрабатывающих производствах рассмотрена задача моделирования процесса обработки партий деталей и оптимизации расписаний их выполнения на приборах КС. На основе декомпозиции ([2]) обобщенной функции системы сформированы следующие иерархически упорядоченные подфункции, реализуемые каждая на соответствующем ей уровне иерархии: 1) оптимизация составов партий деталей (верхний уровень); 2) оптимизация расписаний обработки партий в КС (нижний уровень).

В силу требования оперативной обработки партий оценка оптимальности решений на каждом уровне реализуется: 1) на верхнем уровне – с точки зрения длительности производственного цикла обработки партий деталей; 2) на нижнем уровне – с точки зрения использования временного ресурса приборов, характеризуемого суммарными их простоями. При этом на верхнем уровне системы оптимизации решений достигается внешняя цель ее функционирования, связанная с снижением суммарных временных затрат на обработку деталей разных типов, на нижнем уровне достигается внутренняя цель функционирования системы, связанная с эффективным использованием ресурсов приборов КС.

Процедура оптимизации составов партий и расписаний их выполнения на приборах КС предполагает следующий порядок формирования решений: первоначально определяется решение по составам партий деталей разных типов, затем для сформированного решения по составам партий определяется решение по расписаниям их выполнения в КС [2]. На основе решения по расписанию выполнения партий в КС осуществляется оценка оптимальности решения по их (партий) составам.

В соответствии с [2] предложен подход к моделированию процессов обработки партий деталей в мелкосерийных механообрабатывающих производствах, предусматривающий представление моделей этих процессов в виде совокупности иерархически упорядоченных компонент.

Для синтеза математической модели процессов обработки партий деталей в мелкосерийных механообрабатывающих производствах использованы следующие обозначения [3]: n – количество типов деталей, обрабатываемых в КС; $n^i (i = \overline{1, n})$ – количество деталей каждого типа; m_i – количество партий деталей каждого i -го ($i = \overline{1, n}$) типа (параметры $m_i (i = \overline{1, n})$ образуют вектор M количества партий деталей всех n типов); A – матрица составов партий, элементы a_{ih} которой – это количество деталей i -ых типов в h -х партиях ($h \leq m_i$). Вектор M и матрица $A = \|a_{ih}\|_{n \times m}$ образуют кортеж вида $[M, A]$, который является компонентой модели производственного процесса, соответствующей составам партий деталей. Для формализации компоненты модели производственных процессов, соответствующей расписаниям обработки партий деталей в рассмотрение введена матрица P порядка реализации действий с ними на приборах КС (размер матрицы $n \times n_p$, где n_p – количество партий в последовательностях их обработки на

приборах КС ($n_p = \sum_{i=1}^n m_i$)). В рассмотрение введена матрица R – матрица количества деталей i -х типов в партиях, занимающих j -е позиции в последовательностях их обработки на приборах (r_{ij} – количество деталей i -го типа в партии, занимающей j -ю позицию в этих последовательностях).

Также для моделирования производственных процессов реализации действий с партиями деталей на приборах КС (для определения моментов времени начала обработки деталей, входящих в партии, на приборах КС) использованы следующие обозначения [7]: L – количество приборов в КС;

t_{jq}^{0l} – момент времени начала обработки q -й детали в партии, занимающей в последовательностях их обработки на приборах j -ю позицию,

$q = \overline{1, n_j}$, $n_j = \sum_{h=1}^n r_{hj}$, где n_j – количество деталей в партии в j -й позиции в

последовательностях реализации действий с ними на приборах КС; T^{ol} – матрицы моментов времени начала обработки q -х деталей в партиях, занимающих в последовательностях j -е позиции. Элементы t_{jq}^{ol} ($j = \overline{1, n_p}$, $q = \overline{1, n_j}$) матриц T^{ol} соответствуют моментам времени начала обработки q -х деталей в партиях, занимающих j -е позиции в последовательностях реализации действий с ними на приборах КС. Кортёж вида $[P, R, \{T^{ol} | l = \overline{1, L}\}]$ – компонента модели, соответствующая расписаниям обработки партий деталей на приборах КС. В результате математическая модель производственных процессов обработки партий деталей на приборах КС (модель, определяющая пространственно-временное перемещение деталей, обрабатываемых в составе партий на приборах КС), имеет вид:

- компонента верхнего уровня, соответствующая составам партий: $[M, A]$;
- компонента нижнего уровня, соответствующая расписаниям обработки сформированных партий на приборах КС: $[P, R, \{T^{ol} | l = \overline{1, L}\}]$.

Для оптимизации решений на уровнях иерархии в системе построения расписаний обработки партий в КС с заданным порядком принятия решений и обменом решениями между уровнями применена теория иерархических игр [4]. Использование теоретико-игрового подхода предусматривает назначение игроков на соответствующие уровни оптимизации решений. За верхним уровнем закреплён ведущий игрок, который реализует оптимизацию решений по составам партий, за нижним – ведомый игрок, реализующий оптимизацию расписаний обработки партий в КС. Порядок реализации ходов игроками следующий: 1) первый ход делает ведущий игрок, формируя решение по составам партий, и передает решение на нижний уровень; 2) ход ведомого игрока предусматривает оптимизацию расписания обработки партий деталей на приборах КС, соответствующего текущему решению по составам партий; сформированное расписание ведомый игрок передает на первый уровень для оценки на его основе оптимальности решения по составам партий; 3) игрок первого уровня формирует новое решение по составам партий деталей, передает его игроку второго уровня. Оптимизация решений по составам партий на первом уровне осуществляется с учетом оптимальных расписаний обработки партий деталей на приборах КС. Игроки реализуют указанный порядок ходов до тех пор, пока не будет получено оптимальное решение по составам партий (на верхнем уровне) и соответствующее ему оптимальное расписание обработки партий на приборах КС на нижнем уровне (ситуация равновесия в иерархической игре) [4].

В формализованном виде взаимодействие игроков первого и второго уровней игры реализуется следующим образом: ведущий игрок формирует решение по составам партий $[M, A] \in N_1$. В соответствии с решением $[M, A] \in N_1$ ведомым игроком формируется оптимальное расписание обработки партий в КС:

$$[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^* = \arg \min_{[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}] \in N_2([M, A])} f_2([M, A], [P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}])$$

(решения $[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]$ на нижнем уровне образуют множество $N_2([M, A])$, соответствующее решению $[M, A] \in N_1$ с верхнего уровня). Тогда ответом ведомого игрока на решение ведущего является сформированное расписание $[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^*$, являющееся лучшим среди расписаний, входящих в $N_2([M, A])$. Определение локально оптимальных составов партий $[M, A]^* \in N_1$ реализуется путем решения оптимизационной задачи вида:

$$[M, A]^* = \arg \min_{[M, A] \in N_1} f_1([M, A], [P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^*). \quad \text{Решения}$$

$[M, A]^* \in N_1$ и $[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^* \in N_2([M, A]^*)$ соответствуют ситуации равновесия в иерархической игре двух лиц оптимизации расписаний обработки партий деталей в КС.

Обобщение выполненных выше рассуждений позволило получить математическую модель иерархической игры оптимизации составов партий деталей, обрабатываемых на приборах КС, и расписаний обработки партий в КС в следующем виде:

– первый уровень – оптимизация составов партий ведущим игроком при минимизации производственного цикла обработки деталей разных типов в КС:

$$\min_{[M, A] \in N_1} f_1([M, A], [P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^*);$$

– второй уровень – оптимизация расписаний обработки партий деталей в КС при минимизации простоев приборов этих систем:

$$\min_{[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}] \in N_2([M, A])} f_2([M, A], [P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}])$$

Стратегия поведения ведущего игрока в рассматриваемой двухуровневой иерархической игре основывается на применении им принципа оптимизма, предусматривающего ожидание от ведомого игрока принятия решений, которые обеспечат минимизацию критерия на первом уровне (выигрышем ведущего игрока на первом уровне является уменьшение

производственного цикла обработки деталей, входящих в партии). Стратегия поведения ведомого игрока состоит в выборе таких решений, которые обеспечат реализацию принципа благожелательности (ведомый игрок формирует такие решения, которые обеспечат достижение цели ведущим игроком в максимальной степени – максимизируют выигрыш ведущего игрока). При этом решения, формируемые ведущим игроком, являются не зависимыми от решений ведомого игрока.

Развитием рассмотренной задачи оптимизации составов партий деталей разных типов и расписаний их обработки на приборах КС является задача оптимизации указанных решений при условии формирования комплектов. Данная постановка задачи предполагает, что из деталей, обработанных в партиях на приборах КС, формируются комплекты разных видов и составов.

Для построения математической модели производственных процессов обработки партий деталей при учете указанного условия использованы следующие параметры, дополняющие введенные выше [5]: g – идентификатор типа комплекта, который формируется из результатов обработки партий деталей на приборах КС, g^{KOM} – общее количество типов формируемых комплектов, w_{ig} – количество деталей i -го типа, входящих в один комплект g -го типа. Значения w_{ig} ($i = \overline{1, n}, g = \overline{1, g^{KOM}}$) образуют матрицу составов комплектов W . Через n_g^{KOM} обозначено количество комплектов g -го типа, которые должны быть сформированы из результатов обработки партий i -х типов ($i = \overline{1, n}$), через h_g – индекс формируемого комплекта g -го типа ($h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}$). Количество n^i заданий каждого i -го типа, которые будут выполнены в КС, определяется следующим образом: $n^i = \sum_{g=1}^{g^{KOM}} n_g^{KOM} \cdot w_{ig} \ (i = \overline{1, n})$.

В рассматриваемой задаче функции уровней в иерархической системе предусматривают оптимизацию решений по составам партий деталей разных типов и расписаниям их выполнения на приборах КС. Вследствие этого математическая модель производственных процессов обработки партий деталей в КС с учетом формирования комплектов аналогична математической модели процессов, представленной выше, и включает две иерархически взаимосвязанные компоненты: на верхнем уровне – компонента $[M, A]$, соответствующая составам партий; на нижнем уровне

– компонента $[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]$, соответствующая расписаниям обработки партий на приборах КС.

В соответствии с функциями уровней системы оптимизации расписаний производственных процессов обработки партий деталей на приборах КС между ними выполняется обмен следующими данными: 1) на вход первого уровня подаются: количество n типов деталей, обрабатываемых в КС, количество типов комплектов g^{KOM} , количество комплектов каждого типа n_g^{KOM} ($g = \overline{1, g^{KOM}}$); матрица W составов комплектов; с выхода уровня передаются составы партий деталей i -х типов ($i = \overline{1, n}$) в виде кортежа $[M, A] \in N_1$; 2) на вход второго уровня – решение $[M, A] \in N_1$; на выходе уровня формируется расписание обработки партий деталей на приборах КС в виде $[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^* \in N_2([M, A])$, которое передается на верхний уровень для распределения деталей по комплектам с учетом моментов времени окончания обработки партий на приборах КС. На основе распределения обработанных деталей по комплектам, соответствующего расписанию $[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^* \in N_2([M, A])$, осуществляется оценка оптимальности решения $[M, A] \in N_1$.

В соответствии с выполненными рассуждениями введены в рассмотрение моменты времени окончания формирования комплектов, для которых использованы следующие обозначения [5]: t_{i, h_g}^g – момент времени окончания обработки требуемого количества w_{ig} деталей i -го типа (на последнем L -ом приборе КС), включаемых в формируемый h_g -й комплект g -го типа ($i = \overline{1, n}, h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}, g = \overline{1, g^{KOM}}$); t_{g, h_g} – момент времени окончания формирования h_g -го комплекта g -го типа ($h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}, g = \overline{1, g^{KOM}}$). Значения моментов времени t_{i, h_g}^g равны значениям моментов времени окончания обработки партий деталей i -го типа, включение которых в h_g -й комплект g -го типа позволит закончить формирование его i -ой компоненты (то есть позволит завершить включение в рассматриваемый комплект g -го типа всех деталей i -го типа в количестве w_{ig}). Из полученных таким образом значений t_{i, h_g}^g ($i = \overline{1, n}, h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}, g = \overline{1, g^{KOM}}$) формируются матрицы T^g моментов времени окончания формирования i -х компонент h_g -х

комплектов g -х типов (размер $n \times n_g^{KOM}$). Значения t_{g,h_g} для каждого h_g -го комплекта g -го типа ($h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}, g = \overline{1, g^{KOM}}$) вычисляются в соответствии с выражением вида: $t_{h_g, g} = \max_i(t_{i, h_g}^g)$.

В результате на верхнем уровне иерархической игры на основе расписания $[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^* \in N_2([M, A])$ формируются матрицы T^g ($g = \overline{1, g^{KOM}}$), используемые для вычисления оценок критерия оптимальности решений $[M, A]$ по составам партий.

Оптимизация расписаний обработки партий деталей на приборах КС реализуется путем решения оптимизационной задачи следующего вида:

$$[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^* = \arg \min_{[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}] \in N_2([M, A])} f_2([M, A], [P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]),$$

а оптимизация составов партий деталей, обрабатываемых на приборах КС, осуществляется путем решения оптимизационной задачи вида:

$$[M, A]^* = \arg \min_{[M, A] \in N_1} f_1([M, A], [P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^*, \{T^g | g = \overline{1, g^{KOM}}\}),$$

где набор матриц T^g моментов времени окончания формирования i -х компонент h_g -х комплектов g -х типов является характеристикой решения, на основе которой вычисляются оценки критерия f_l на верхнем уровне иерархической игры.

В результате построена математическая модель иерархической игры оптимизации составов партий деталей, обрабатываемых в КС, и расписаний выполнения действий с ним на приборах этих систем в следующем общем виде:

– первый уровень (оптимизация составов партий деталей ведущим игроком при учете формирования комплектов):

$$\min_{[M, A] \in N_1} f_1([M, A], [P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]^*, \{T^g | g = \overline{1, g^{KOM}}\});$$

– второй уровень (оптимизация ведомым игроком расписания обработки партий деталей, составы которых сформированы ведущим игроком на верхнем уровне):

$$\min_{[P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}] \in N_2([M, A])} f_2([M, A], [P, R, \{T^{0l} | l = \overline{1, L}\}]).$$

На основе рассмотренных математических моделей производственных процессов обработки партий деталей (в том числе, при

условии формирования комплектов) разработана математическая модель этих процессов при введении ограничения на ресурсы обрабатывающих систем. Введение ограничения предусматривает, что заданными являются интервалы времени функционирования систем, в течение которых реализуется обработка партий в КС. В частности, интервалами времени функционирования КС ограниченной длительности являются смены, в течение которых приборами реализуется обработка партий деталей, поступающих на их вход. В этом случае необходимо сформировать совокупности партий, обрабатываемых на приборах КС в течение заданных временных интервалов ограниченной длительности, которые называются группами партий. Введенные в рассмотрение группы партий, оптимизация составов которых необходима, соответствуют сменно-суточным заданиям на функционирования КС. Декомпозиция обобщенной функции системы оптимизации расписаний обработки партий деталей в течение интервалов времени ограниченной длительности позволила сформировать следующие ее подфункции, распределенные по уровням иерархии [2]: 1) первый (верхний) уровень – оптимизация составов партий деталей; 2) второй уровень – оптимизация составов групп партий, обрабатываемых в течение интервалов времени ограниченной длительности (формирование сменно-суточных заданий на обработку партий деталей); 3) третий (нижний) уровень – оптимизация расписаний обработки партий деталей, включенные в группы (оптимизация расписаний обработки партий деталей в сменно-суточных заданиях). В соответствии с полученной иерархией задач оптимизации решений построена математическая модель производственных процессов обработки партий деталей в течении интервалов времени функционирования КС ограниченной длительности, которая имеет в своем составе три компонента, распределенные по уровням иерархии. Первая компонента математической модели (на верхнем уровне) соответствует составам партий деталей и имеет вид кортежа $[M, A]$ (обозначения элементов, входящих в него, введены выше). Для остальных компонент математической модели процессов обработки партий деталей в течение интервалов времени функционирования КС ограниченной длительности использованы следующие обозначения [6]:

1. Обозначения для компоненты модели, соответствующей составам групп партий деталей: $N^z (z = \overline{1, Z})$ – группа партий деталей, обрабатываемых в течение одного из интервалов $t^z (z = \overline{1, Z})$ времени функционирования КС ограниченной длительности; m_i^z – количество партий деталей i -го типа в группе N^z ; $(A)_i^z$ – вектор количества деталей i -го типа в m_i^z партиях в группе N^z . Включенным в группу N^z партиям

деталей i -го типа соответствует кортеж параметров вида: $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k$ (где k – номер кортежа параметров, соответствующего партиям i -го типа, включенным в группу N^z), тогда группа N^z – это множество кортежей вида: $N^z = \{[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \mid k = \overline{1, k_z}\}^z$. Для партий деталей, не включенных в группы $N^z (z = \overline{1, Z})$ (не включенных ни в одно сменно-суточное задание), введено множество Q вида: $Q = \{[i, m_i^q, (A)_i^q]_k \mid k = \overline{1, k_q}\}$, где m_i^q – количество партий i -го типа, не включенных в группы $N^z (z = \overline{1, Z})$, вектор $(A)_i^q$ – вектор составов партий, не включенных в группы $N^z (z = \overline{1, Z})$ (множество Q соответствует незавершенному производству для заданного количества временных интервалов t^z (смен)). Тогда компонента модели, соответствующая составам групп партий деталей, обрабатываемых в КС в соответствии с сменно-суточным заданием, имеет вид кортежа: $\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q$.

2. Обозначения для расписаний обработки партий деталей, включенных в группы N^z (в сменно-суточные задания), в течение интервалов времени $t^z (z = \overline{1, Z})$ ограниченной длительности: $P^z (z = \overline{1, Z})$ – матрицы порядка обработки партий деталей, включенных в группы $N^z (z = \overline{1, Z})$ на приборах КС (размер $k \times n_p^z$, где k_z – количество типов деталей, партии которых включены в группу N^z , n_p^z – количество партий в последовательностях их обработки на приборах КС для группы N^z), $R^z (z = \overline{1, Z})$ – матрицы количества деталей i -х типов в партиях, включенных в группы $N^z (z = \overline{1, Z})$ и занимающих в последовательностях реализации действий с ними на приборах КС j -е позиции, $(T^{ol})^z (z = \overline{1, Z})$ – матрицы моментов времени начала обработки q -х деталей в партиях, включенных в группы N^z и занимающих j -е позиции в последовательностях реализации действий с ним на приборах КС (элементы $(t_{jq}^{ol})^z$ матриц $(T^{ol})^z$ соответствуют моментам времени начала обработки q -х деталей в партиях, включенных в группы $N^z (z = \overline{1, Z})$ и занимающих j -е позиции в последовательностях реализации действий с ними на приборах КС). Компонента математической модели производственных процессов обработки партий деталей в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования, соответствующая расписаниям реализации действий с ними на приборах этих систем, имеет вид:

$\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}] | z = \overline{1, Z}\}$. Расписание обработки партий деталей, включенных в группы $N^z (z = \overline{1, Z})$, формируется в предположении, что порядок реализации действий с ними на приборах одинаков.

Итоговый вид математической модели производственных процессов обработки партий деталей на приборах КС в течение временных интервалов их функционирования ограниченной длительности следующий:

- 1) компонента, соответствующая составам партий деталей $[M, A]$;
- 2) компонента, соответствующая составам групп партий деталей (сменно-суточным заданиям и незавершенному производству) $\{[N^z | z = \overline{1, Z}], Q\}$;
- 3) компонента, соответствующая расписаниям обработки партий деталей, включенных в группы, на приборах КС $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}] | z = \overline{1, Z}\}$.

На основе выполненной декомпозиции обобщенной функции системы построения расписаний обработки партий деталей в КС, действия с которыми осуществляются в течение временных интервалов t^z ограниченной длительности, сформированной математической модели производственных процессов обработки партий в КС, определены виды решений, оптимизация которых на соответствующих уровнях иерархии позволяет решить рассматриваемую задачу:

- 1) на первом (верхнем) уровне реализуется оптимизация решений $[M, A]$ по составам партий деталей, обрабатываемых в течение интервалов времени t^z функционирования систем ограниченной длительности;
- 2) на втором уровне реализуется оптимизация решений $\{[N^z | z = \overline{1, Z}], Q\}$ по составам групп партий деталей, обрабатываемых в течение интервалов времени ограниченной длительности (по составам сменно-суточных заданий и незавершенному производству, которому соответствует множество кортежей Q);
- 3) на третьем (нижнем) уровне реализуется оптимизация расписаний $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}] | z = \overline{1, Z}\}$ обработки партий деталей, включенных в группы $N^z (z = \overline{1, Z})$ (обработка которых реализуется в соответствии с сформированными сменно-суточными заданиями).

В соответствии с сформулированным подходом к многоуровневой (иерархической) оптимизации (то есть в соответствии заданными: порядком принятия решений на уровнях иерархии, обменом решениями между уровнями, необходимостью оценки оптимальности решений на вышестоящих уровнях на основе оптимальных решений с нижестоящих уровней) определение наилучших решений по составам партий, составам

групп партий и расписаниям обработки деталей, входящих в партии, включенные в группы, реализуется с использованием иерархических игр [4]. В этом случае ведущим игроком на верхнем уровне реализуется оптимизация решений $[M, A]$ по составам партий деталей, игроком второго уровня реализуется оптимизация решений $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]$ по составам групп партий деталей; игроком третьего уровня реализуется оптимизация решений $\{[P^z, R^z, \{(T^{ol})^z \mid l = \overline{1, L}\}] \mid z = \overline{1, Z}\}$ по расписаниям обработки деталей, входящих в партии, включенные в группы. Реализация теоретико-игрового подхода к оптимизации указанных решений предусматривает взаимодействие игроков различных уровней, реализуемое следующим образом:

1. Взаимодействие игроков первого и второго уровней предполагает, что ведущий игрок на первом уровне формирует решение $[M, A] \in N_1$ и передает его на второй уровень. На втором уровне определяется локально оптимальное решение по составам групп партий, соответствующее решению $[M, A] \in N_1$, путем решения оптимизационной задачи следующего вида $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]^* =$

$$= \arg \min_{[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q] \in N_2([M, A])} f_2([\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q, \{[P^z, R^z, \{(T^{ol})^z \mid l = \overline{1, L}\}] \mid z = \overline{1, Z}\}^*)$$

(оптимальное решение по составам групп, соответствующее решению $[M, A] \in N_1$). Ответом игрока второго уровня является сформированное им решение $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]^*$, выбранное в $N_2([M, A])$. Определение составов партий ведущим игроком на первом уровне реализуется путем решения задачи оптимизации вида

$$[M, A]^* = \arg \min_{[M, A] \in N_1} f_1([M, A], [\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]^*).$$

Решение $[M, A]^* \in N_1$ на первом уровне и решение $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]^*$ (где $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]^* \in N_2([M, A]^*)$) на втором уровне соответствует ситуации равновесия при взаимодействии игроков этих уровней (решения, формирующие ситуацию равновесия, являются решением игры для первых двух уровней).

2. Взаимодействие игроков второго и третьего уровней предполагает, что игрок на втором уровне формирует решение по составам групп $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q] \in N_2([M, A])$ и передает его на третий уровень. Игрок на третьем уровне для решения $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q] \in N_2([M, A])$ со второго уровня определяет оптимальное решение $\{[P^z, R^z, \{(T^{ol})^z \mid l = \overline{1, L}\}] \mid z = \overline{1, Z}\}^*$ по расписаниям обработки партий,

входящих в каждую из групп, соответствующие решению со второго уровня (при $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}]^* \in N_3^z(N^z)$, где $N_3^z(N^z)$ ($z = \overline{1, Z}$) – множества расписаний обработки партий, включенных в группы N^z ($z = \overline{1, Z}$; $N_3^z(N^z) \subset N_3(\{N^z | z = \overline{1, Z}\}, Q)$). Ответом игрока третьего уровня является оптимальное решение $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}] | z = \overline{1, Z}\}^*$, выбранное в множестве $N_3(\{N^z | z = \overline{1, Z}\}, Q)$. Определение оптимального решения $\{N^z | z = \overline{1, Z}\}^* \in N_2(I M, A)$ по составам групп игроком второго уровня реализуется путем решения оптимизационной задачи вида $\{N^z | z = \overline{1, Z}\}^* =$

$$= \arg \min_{\{N^z | z = \overline{1, Z}\}, Q \in N_2(I M, A)} f_I(\{N^z | z = \overline{1, Z}\}, Q, \{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}] | z = \overline{1, Z}\}^*).$$

Решение $\{N^z | z = \overline{1, Z}\}^* \in N_2(I M, A)$ на втором уровне и решение $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}] | z = \overline{1, Z}\}^* \in N_3(\{N^z | z = \overline{1, Z}\}, Q)^*$ на третьем уровне соответствует ситуации равновесия при взаимодействии игроков этих уровней (решения, формирующие ситуацию равновесия, являются решениями игры для второго и третьего уровней).

В соответствии с выполненными рассуждениями иерархическая игра оптимизации расписаний обработки партий деталей на приборах КС при задании ограничения на длительности интервалов времени t^z их (систем) функционирования имеет следующий вид:

- 1) первый уровень (оптимизация составов партий деталей):

$$\min_{[M, A] \in N_1} f_I([M, A], \{N^z | z = \overline{1, Z}\}^*);$$

- 2) второй уровень (оптимизация групп партий, обрабатываемых в течение интервалов времени t^z ограниченной длительности):

$$\min_{\{N^z | z = \overline{1, Z}\}, Q \in N_2(I M, A)} f_I(\{N^z | z = \overline{1, Z}\}, Q, \{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}] | z = \overline{1, Z}\}^*);$$

- 3) третий уровень (оптимизация расписаний обработки партий деталей, включенных в группы, в течение интервалов времени t^z ($z = \overline{1, Z}$) ограниченной длительности):

$$\min_{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}] \in N_3^z(N^z)} f_3^z([P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l = \overline{1, L}\}]),$$

где $z = \overline{I, Z}$, $N_3^z(N^z) \subset N_3(\{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q)$.

Решением иерархической игры трех лиц являются: 1) решение $[M, A]^* \in N_1$ по составам партий на первом уровне (являющееся результатом решения задачи

$$[M, A]^* = \arg \min_{[M, A] \in N_1} f_1([M, A], \{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q^*); \quad 2) \quad \text{решение}$$

$\{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q^* \in N_2([M, A]^*)$, обеспечивающее получение решения $[M, A]^*$, являющееся лучшим для оптимизационной задачи $\{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q^* =$

$$= \arg \min_{\{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q \in N_2([M, A]^*)} f_1(\{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q, \{P^z, R^z, \{(T^{ol})^z | l = \overline{I, L}\} | z = \overline{I, Z}\}^*);$$

3) расписания $\{P^z, R^z, \{(T^{ol})^z | l = \overline{I, L}\} | z = \overline{I, Z}\}^* \in N_3(\{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q^*)$ обработки партий деталей, входящих в группы, на приборах КС, обеспечивающие получение решения $\{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q^* \in N_2([M, A]^*)$, являющиеся результатом решения оптимизационной задачи следующего вида $[P^z, R^z, \{(T^{ol})^z | l = \overline{I, L}\}]^* =$

$$= \arg \min_{[P^z, R^z, \{(T^{ol})^z | l = \overline{I, L}\}] \in N_3^z(N^z)} f_3^z([P^z, R^z, \{(T^{ol})^z | l = \overline{I, L}\}]), \quad \text{где } z = \overline{I, Z} \text{ и}$$

$$N_3^z(N^z) \subset N_3(\{N^z | z = \overline{I, Z}\}, Q^*).$$

Развитием рассмотренных выше двух различных задач оптимизации расписаний обработки партий деталей в КС при формировании комплектов и ограничении на длительности интервалов времени функционирования систем является задача, в которой указанные условия рассматриваются совместно. Решение этой задачи обеспечивает оптимизацию сменно-суточных заданий по обработке партий деталей при условии, что из обработанных деталей формируются комплекты разных видов и разных составов (в частности, узловые комплекты). Декомпозиция обобщенной функции системы оптимизации решений для рассматриваемой задачи позволила определить ее подфункции, реализуемые на уровнях иерархии, соответствующие задаче оптимизации расписаний при ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС: на первом (верхнем) уровне системы реализуется оптимизация составов партий деталей, на втором уровне – оптимизация составов групп партий, обрабатываемых в течение интервалов времени t^z ограниченной

длительности функционирования КС; на третьем (нижнем) уровне – оптимизация расписаний обработки партий деталей, включенных в группы.

При построении математической модели производственных процессов обработки партий при ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС учтено условие формирования комплектов. Для того, чтобы охарактеризовать комплекты, сформированные из обработанных в составе партий деталей, включенных в группы, использованы обозначения: n_g – количество комплектов g -го типа, которые будут сформированы из деталей всех n ($i = \overline{1, n}$) типов, обработанных в составе партий, включенных в группы N^z ($z = \overline{1, Z}$), N_g – вектор количества комплектов, сформированных из деталей, обработанных в составе партий, включенных в группы N^z ($z = \overline{1, Z}$). Вектор N_g интерпретируется как параметр математической модели производственных процессов обработки партий деталей при учете введенных условий. Он характеризует составы групп партий, которым соответствует компонента математической модели производственных процессов на втором уровне. По этой причине компонента второго уровня математической модели производственных процессов обработки партий деталей модифицирована следующим образом: $\{ \{ N^z \mid z = \overline{1, Z} \}, Q, N_g \}$. В результате математическая модель производственных процессов обработки партий деталей при ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС и формировании комплектов получена в следующем виде:

1) компонента, соответствующая составам партий деталей $[M, A]$;
 2) компонента, соответствующая составам групп партий деталей и количеству комплектов разных типов, сформированных из обработанных деталей $\{ \{ N^z \mid z = \overline{1, Z} \}, Q, N_g \}$;

3) компонента, соответствующая расписаниям обработки партий деталей, включенных в группы, на приборах КС $\{ \{ P^z, R^z, \{ (T^{ol})^z \mid l = \overline{1, L} \} \} \mid z = \overline{1, Z} \}$.

Обмен решениями по составам партий $[M, A]$, составам групп партий $\{ \{ N^z \mid z = \overline{1, Z} \}, Q, N_g \}$, расписаниям $\{ \{ P^z, R^z, \{ (T^{ol})^z \mid l = \overline{1, L} \} \} \mid z = \overline{1, Z} \}$ обработки партий в группах на приборах КС для рассматриваемой задачи аналогичен обмену решениями между уровнями в рассмотренной выше задаче с ограничением на длительности интервалов времени функционирования систем. Вид математической модели иерархической игры оптимизации расписаний обработки партий в КС (предусматривающей оптимизацию составов партий, составов групп партий

и расписаний обработки партий, включенных в группы на приборах КС) при формировании комплектов следующий:

1) первый уровень (оптимизация составов партий деталей (с учетом формирования комплектов)):

$$\max_{[M,A] \in N_1} f_1([M,A], [\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\}, Q, N_g]^*);$$

2) второй уровень (оптимизация групп партий, обрабатываемых в течение интервалов времени t^z ограниченной длительности с учетом формирования комплектов):

$$\min_{[\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\}, Q] \in N_2([M,A])} f_2([\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\}, Q, N_g, [\{P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{1,L}\}\} \mid z = \overline{1,Z}]^*);$$

3) третий уровень (оптимизация расписаний обработки партий деталей, включенных в группы, в течение интервалов времени t^z ($z = \overline{1,Z}$) ограниченной длительности):

$$\min_{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{1,L}\}] \in N_3^z(N^z)} f_3^z([P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{1,L}\}]),$$

где $z = \overline{1,Z}$, $N_3^z(N^z) \subset N_3([\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\}, Q]$.

В соответствии с представленной моделью иерархической игры на втором уровне иерархии системы наряду с задачей оптимизации решений $[\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\}, Q, N_g]^* \in N_2([M,A])$ по составам групп, соответствующих текущему решению $[M,A]$ по составам партий, реализуется распределение деталей, обработанных в составе партий, включенных в группы N^z ($z = \overline{1,Z}$), по комплектам заданных составов (для оценки оптимальности решения по составам групп реализуется распределение деталей по комплектам). Так как ресурс системы является ограниченным, оптимизация решений с учетом ограниченного ресурса осуществляется на втором уровне иерархии, тогда требуется идентифицировать на этом уровне такие решения, которые обеспечивают минимизацию количества не использованного ресурса (не эффективно использованного ресурса). Ресурсом в рассматриваемой задаче является время функционирования КС. Тогда для эффективного использования ресурса требуется минимизировать количество деталей, которые обрабатываются в партиях, включенных в группы, но которые не будут включены в полностью сформированные комплекты. В результате оптимизация решений по составам групп на втором уровне обеспечит минимизацию количества обработанных деталей, которые не будут

включены в полностью сформированные комплекты. Тем самым будет обеспечено снижение неэффективного использования ограниченного ресурса системы и достижение внутренней цели функционирования систем.

Вектор N_g количества комплектов каждого типа, сформированный в результате распределения обработанных в КС деталей, входящих в партии, включенные в группы, передается в качестве параметра решения $[\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g]^* \in N_2([M, A])$ на первый уровень, где используется для определения оценки оптимальности решения $[M, A]$ по составам партий. При этом внешняя цель функционирования системы обуславливает на верхнем (первом) уровне необходимость максимизации общего количества комплектов, сформированных из деталей, обработанных в составе партий, включенных в группы.

С учетом необходимости формирования комплектов из деталей, обработанных в составе партий, включенных в группы $N^z (z = \overline{I, Z})$, равновесие в иерархической игре трех лиц, соответствующее решению задачи оптимизации расписаний, имеет следующий вид:

1) на первом уровне – решение $[M, A]^* \in N_1$ по составам партий, являющееся результатом решения оптимизационной задачи вида $[M, A]^* = \arg \min_{[M, A] \in N_1} f_1([M, A], [\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g]^*);$

2) решение $[\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g]^* \in N_2([M, A]^*)$, обеспечивающее получение решения $[M, A]^* \in N_1$, являющееся решением задачи $[\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g]^* =$

$$= \arg \min_{[\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g] \in N_2([M, A]^*)} f_1([\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g], [\{P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{I, L}\} \mid z = \overline{I, Z}\}]);$$

3) расписания
 $[\{P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{I, L}\} \mid z = \overline{I, Z}\}^* \in N_3([\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g]^*)$ обработки
 партий деталей, входящих в группы, на приборах КС, обеспечивающие
 получение решения $[\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g]^* \in N_2([M, A]^*)$, являющиеся
 результатом решения оптимизационной задачи вида
 $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{I, L}\}]^* =$

$$= \arg \min_{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{I, L}\}] \in N_3^z(N^z)} f_3^z([P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{I, L}\}]), \quad \text{где } z = \overline{I, Z} \text{ и}$$

$$N_3^z(N^z) \subset N_3([\{N^z \mid z = \overline{I, Z}\}, Q, N_g]^*).$$

Заключение. Современные методы решения задач оптимизации расписаний обработки партий деталей в конвейерных системах характеризуются ограничениями на размерность задач, не учитывают технологические параметры производственных процессов обработки партий деталей, не позволяют гарантированно получать эффективные решения при различных значениях входных параметров задач. В связи с этим предложен иерархический подход к решению задач математического моделирования производственных процессов обработки партий деталей в КС и последующей оптимизации расписаний обработки партий в этих системах. Иерархический подход к математическому моделированию производственных процессов обработки партий деталей в КС предполагает представление моделей этих процессов в виде совокупности иерархически упорядоченных компонент. В соответствии с этим подходом получены следующие математические модели производственных процессов в КС: 1) процессов обработки партий, 2) процессов обработки партий при формировании комплектов, 3) процессов обработки партий при задании ограничения на длительности интервалов времени функционирования КС, 4) процессов обработки партий при задании ограничения на длительности интервалов времени функционирования КС и формировании комплектов.

Применение иерархического подхода к решению задач оптимизации расписаний обработки партий деталей в КС предполагает представление обобщенной задачи поиска лучших решений в виде совокупности иерархически упорядоченных подзадач, для каждой из которых реализуется идентификация оптимальных решений на соответствующих им уровнях иерархии. С использованием иерархического подхода к построению расписаний обработки партий синтезированы математические модели иерархических игр, позволяющие идентифицировать наилучшие решения следующих задач: 1) оптимизации расписаний обработки партий деталей в КС; 2) оптимизации расписаний обработки партий деталей в КС при формировании комплектов; 3) оптимизации расписаний обработки партий деталей в КС при задании ограничения на длительности интервалов времени функционирования систем; 4) оптимизации расписаний обработки партий деталей в КС при задании ограничения на длительности интервалов времени функционирования систем и условия формирования комплектов.

Полученные модели иерархических игр представляют собой способы совместной оптимизации решений по составам партий, составам групп партий, расписаниям обработки партий на приборах КС. Использование предложенных математических моделей производственных процессов обработки партий деталей в КС, математических моделей иерархических игр оптимизации расписаний обработки партий деталей в КС позволяет: значительно увеличить размерность решаемых задач, учитывать при

оптимизации составов партий, составов групп партий временные параметры производственных процессов, гарантировать получение эффективных решений при различных значениях входных данных задач, являющиеся лучшими, чем решения, получаемые с использованием известных метаэвристических алгоритмов.

Библиографический список

1. Agha M. Integrated management of energy and production: scheduling of batch process and Combined Heat& Power plant / M. Agha. – University of Toulouse, National Polytechnic Institute of Toulouse (FRANCE), 2009/ – 255 p.
2. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара – М.: Из-во «Мир», 1973. – 344 с.
3. Кротов К.В. Комплексный метод определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки в конвейерных системах / К.В. Кротов // Вычислительные технологии, Изд-во Института вычислительных технологий СО РАН. – 2018. – Том 23, №3. – С. 58-76.
4. Гермейер Ю.Б. Игры с противоположными интересами / Ю.Б. Гермейер. – М.: Наука, 1976. – 327 с.
5. Кротов К.В. Обоснование методов построения комплексных расписаний обработки партий данных при условии оперативного формирования комплектов из результатов / К.В. Кротов // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – №4. – С.58-72.
6. Кротов К.В. Построение комплексных расписаний обработки пакетов данных в конвейерной системе при задании ограничений на длительность интервалов времени ее функционирования / К.В. Кротов // Труды учебных заведений связи. – 2020. – Т.6, №3. – С.75-89.

Bibliograficheskiy spisok

1. Agha M. Integrated management of energy and production: scheduling of batch process and Combined Heat& Power plant / M. Agha. – University of Toulouse, National Polytechnic Institute of Toulouse (FRANCE), 2009/ – 255 p.
2. Mesarovich M. Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem / M. Mesarovich, D. Mako, I. Takahara – M.: Iz-vo «Mir», 1973. – 344 s.
3. Krotov K.V. Kompleksnyy metod opredeleniya effektivnykh reshenij po sostavam partij dannyh i raspisaniyam ih obrabotki v konvejernykh sistemah / K.V. Krotov // Vychislitel'nye tekhnologii, Izd-vo Instituta vychislitel'nykh tekhnologij SO RAN. – 2018. – Tom 23, №3. – S. 58-76.
4. Germejer YU.B. Igry s neprotivopolozhnyimi interesami / YU.B. Germejer – M.: Nauka, 1976. – 327 s.

5. Krotov K.V. Obosnovanie metodov postroeniya kompleksnyh raspisanij obrabotki partij dannyh pri uslovii operativnogo formirovaniya komplektov iz rezul'tatov / K.V. Krotov // Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii. – 2018. – №4. – S.58-72.
6. Krotov K.V. Postroenie kompleksnyh raspisanij obrabotki paketov dannyh v konvejernoj sisteme pri zadanii ogranichenij na dlitel'nost' intervalov vremeni e funkcionirovaniya / K.V. Krotov // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. – 2020. – T.6, №3. – S.75-89.

Кротов Кирилл Викторович, к.т.н., доцент, Севастопольский государственный университет

HIERARCHICAL MODELS OF SCHEDULE OPTIMIZATION BATCH PROCESSING IN SMALL-SCALE PRODUCTION

K.V. Krotov

The tasks of optimizing the schedules for processing batches of parts in small-scale production are unsolvable for a limited time. In this regard, the development of new approaches for solving the above problems of large dimension is relevant. At the same time, practical needs make it necessary to take into account the features of the production processes of batch processing associated with the formation of kits and the setting of restrictions on the duration of the time intervals of the processing systems. The paper develops a hierarchical approach to mathematical modeling of the processes of processing batches of parts in small-scale production, which allowed synthesizing models of these processes used in solving various tasks of optimizing schedules. A hierarchical approach to optimizing batch processing schedules is also being developed, which has made it possible to form mathematical models of hierarchical games for solving various tasks of managing production processes, which also take into account the features associated with the formation of kits and restrictions on the resources of processing systems.

Keywords: flexible production system, batches of parts, schedules, kits, resource constraints, hierarchical models of production processes, models of hierarchical games of schedules optimization

Krotov Kirill Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, Sevastopol state University

УДК 681.2.08

ДАТЧИКИ ЧЕТЫРЕХ ОСЕВОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО БЛОКА И ВЕЛИЧИНА ШУМА

Изместьев И.Д.¹, Щенятский А.В.²

Аннотация. Рассмотрены варианты расположения осей гироскопического блока, включающего в себя четыре чувствительных элемента твердотельных волновых гироскопов в качестве датчиков. Методом наименьших квадратов определен положительный эффект от комплексирования избыточной информации в случаях исправной и аварийной работы. Проведено моделирование работы чувствительных элементов и рассмотрены первые моды колебаний. Определены эффективные углы, определяющие расположение измерительных осей в системе координат гироскопического блока.

Ключевые слова: ТВГ, гироскоп, чувствительный элемент, мода колебаний, избыточность, комплексирование, метод наименьших квадратов

В статье рассматривается миниатюрный гироскопический блок, включающий четыре чувствительных элемента (ЧЭ) твердотельных волновых гироскопа (ТВГ). Три оси чувствительности датчиков расположены взаимно перпендикулярно. Ось четвертого датчика расположена под равными углами к трем осям ЧЭ и обеспечивает избыточность измерений.

Такой гироскопический блок может использоваться в малых спутниках, например, формата CubeSat [1], применяться в беспилотных летательных аппаратах среднего класса или в ракетной технике. Если рассматривать в качестве альтернативы ТВГ, например, микро электромеханические гироскопы (МЭМС) или волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), то твердотельные волновые гироскопы обладают более высокой стойкостью к ионизирующему воздействию. Кроме того, твердотельные волновые гироскопы имеют значительную долговечность, механическую прочность, высокую точность измерения угла и скорости, сохраняют инерциальную информацию при кратковременном отключении питания [2].

В избыточном гироскопическом блоке можно повысить точность всей системы с помощью алгоритмов комплексирования. Однако, в зависимости от способа взаимного расположения измерительных осей гироскопического блока качество выходного сигнала может отличаться.

Так как размеры чувствительных элементов достаточно малы [3], а именно внешние диаметры находятся в пределах 2 – 5 мм, высота изменяется от 0,33 до 3,3 мм, то применение четырех ТВГ не приведет к значительному

увеличению размеров прибора. Известно, что для ТВГ наиболее предпочтительной для работы является вторая мода колебаний (**Рис.1**).

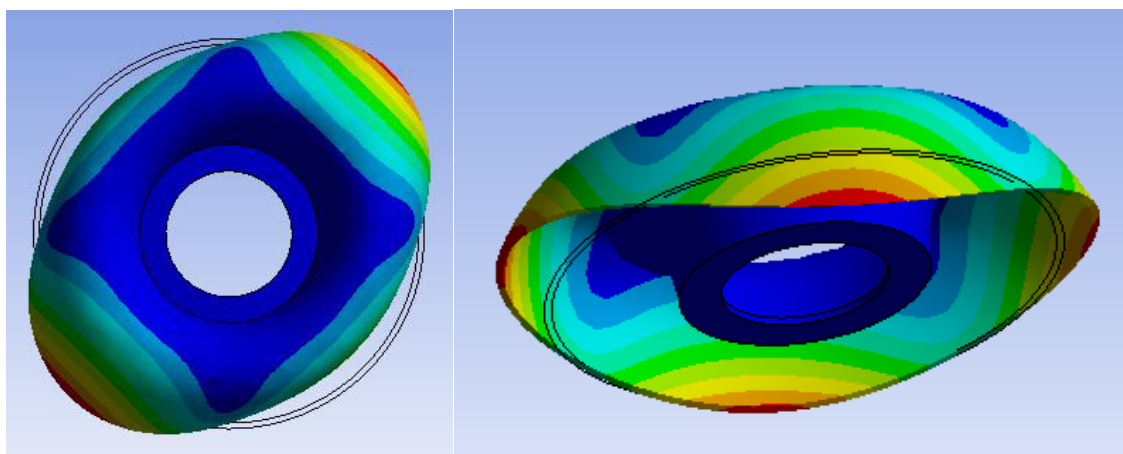


Рис.1 – Вторая мода колебаний тороидального резонатора. Результат моделирования конечных элементов ПО Ansys

Была рассмотрена конструкция тороидального кварцевого резонатора ТВГ [4]. Их производство целесообразно за счет использования технологии выдувания стекла [5]. Моделирование всех резонаторов выполнялось в ПО Ansys (Номер лицензии: ANSYS16.1 №607 281) (**Рис.1**), с помощью метода конечных элементов [6]. Сетка элементов была построена в соответствии с рекомендациями, данными в работе [7].

В результате проведения численных экспериментов определено влияние геометрических характеристик тороидального резонатора на частоту второй моды собственных колебаний (**Рис.2**). После применения метода наименьших квадратов конечная эмпирическая зависимость частоты колебаний от размеров и их соотношений (коэффициент формы) в форме полинома примет вид:

$$F = \frac{649 + 85K_d^2 - 479K_d - 416K_h + 6625K_x + 199K_dK_h - 1721K_dK_x - 3048K_hK_x}{d} \quad (1)$$

где F – частота второй моды колебаний в кГц, d – диаметр основания тороидального резонатора в мм, K_d , K_h , K_x – коэффициенты внешнего диаметра, высоты и толщины стенки соответственно.

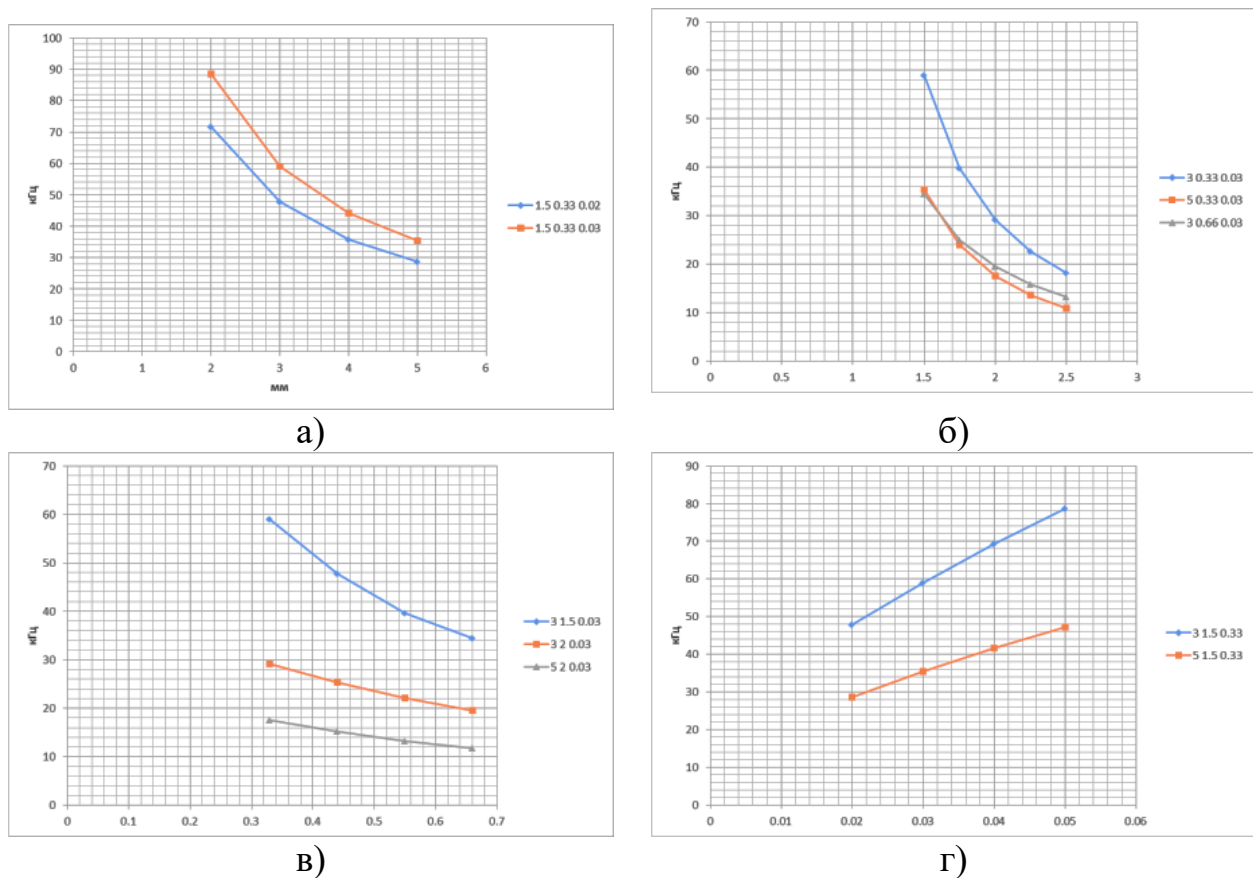


Рис.2 – Зависимость частоты второй моды собственных колебаний тороидального резонатора от:

**а) диаметра основания d , б) коэффициента диаметра K_d ,
в) коэффициента высоты K_h , г) коэффициента толщины K_x**

После подбора оптимальных соотношений геометрических параметров тороидального резонатора из условия достижения максимальной амплитуды колебаний при условии обеспечения требуемой долговечности проведено рассмотрение трех возможных случаев расположения осей чувствительных элементов [8].

В качестве метода комплексирования однородной информации использован метод наименьших квадратов (МНК), из-за его простоты и распространенности.

Введена ортогональная система координат блока x, y, z и четыре вектора a, b, c, d , определяющие оси измерения датчиков ТВГ. Связь между системой координат блока и измерительной осью a описана следующим выражением:

$$a = x \cdot \cos \alpha \cos \beta + y \cdot \cos \alpha \sin \beta + z \cdot \sin \alpha,$$

где α – угол между вектором a и плоскостью XOY , а β – угол между проекцией вектора a на плоскость XOY и осью OX , в соответствии с **Рис.3**.

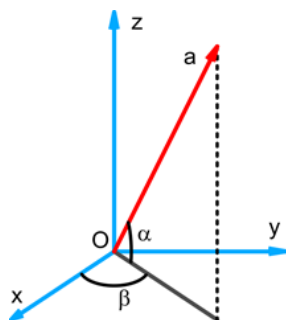


Рис.3 – Расположение оси a в системе координат гироскопического блока

Записывая по аналогии связь для каждой измерительной оси, получили следующую систему:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 \cos \beta_1 & \cos \alpha_1 \sin \beta_1 & \sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_2 \cos \beta_2 & \cos \alpha_2 \sin \beta_2 & \sin \alpha_2 \\ \cos \alpha_3 \cos \beta_3 & \cos \alpha_3 \sin \beta_3 & \sin \alpha_3 \\ \cos \alpha_4 \cos \beta_4 & \cos \alpha_4 \sin \beta_4 & \sin \alpha_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где H – матрица измерений, определяемая по углам ориентации измерительных осей в системе координат измерительного блока. При необходимости эта матрица может быть расширена до любого числа измерительных осей.

Модель сигнала гироскопа (3) представлена в виде полезного сигнала с аддитивной случайной погрешностью, распределенной по закону Гаусса:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Компоненты случайной величины v_1, v_2, v_3, v_4 с среднеквадратическим отклонением σ принимаются равными из предположения, что датчики ТВГ произведены с хорошей повторяемостью и взаимозаменяемы. Следует отметить, что подобная модель допустима для ТВГ, так как составляющая нормального шума одна из ключевых в структуре шумов, хотя и не единственная [9].

При работе гироскопического блока, требуется решать обратную задачу: из измеренных величин вращения по осям a, b, c, d , необходимо определять величины вращения по x, y, z . Решают систему линейных уравнений (3), но так как система является избыточной и точного решения не существует, то возможно

применить метод наименьших квадратов. При МНК решение сводится к поиску матрицы H^* – обратной матрице измерений. Нет необходимости считать эту матрицу непосредственно внутри блока, она может быть заранее вычислена по формуле:

$$H^* = (H \cdot H^T)^{-1} H^T; \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = H^* \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Эффект от комплексирования в процентном отношении может быть определен как $\Delta = \frac{\sigma_k - \sigma}{\sigma} \cdot 100\%$, где σ_k – величина шума после комплексирования сигнала, σ – величина шума отдельного датчика. Величина σ_k определяется аналитически по формуле:

$$\sigma_k = \sqrt{H_{ii} \cdot \sigma^2}, \quad (5)$$

где H_{ii} – элемент диагонали матрицы $(H \cdot H^T)^{-1}$.

Обычно датчики при создании избыточной системы располагают на гранях пирамиды, как, например, в [10], но для шести датчиков ТВГ. Такой подход облегчает проектирование и производство. В штатном режиме работы расположение осей должно обеспечивать максимальную фильтрацию. Для анализа были взяты три конструкции:

Конструкция 1: Оси a, b, c расположены вдоль направлений осей x, y, z соответственно. Ось d имеет равные углы с осями a, b, c (то есть угол между проекцией d на плоскость xOy и осью x равен 45°). **Рис.4а).**

Конструкция 2: Оси направлены вдоль нормалей граней четырехгранной правильной пирамиды. **Рис.4б).** Угол обеспечивающий наибольший эффект от комплексирования (уменьшение величины шума) рассчитан аналитически, с помощью минимизации следа матрицы $(H \cdot H^T)^{-1}$. Угол между основанием пирамиды и осями измерениям приближенно равен $35,265^\circ$.

Конструкция 3: Оси a, b, c направлены вдоль нормалей граней трехгранной правильной пирамиды. Ось d направлена вдоль оси z . **Рис.4в).** Аналогично предыдущему случаю определен оптимальный угол между осями a, b, c и основанием пирамиды равен $19,47^\circ$.

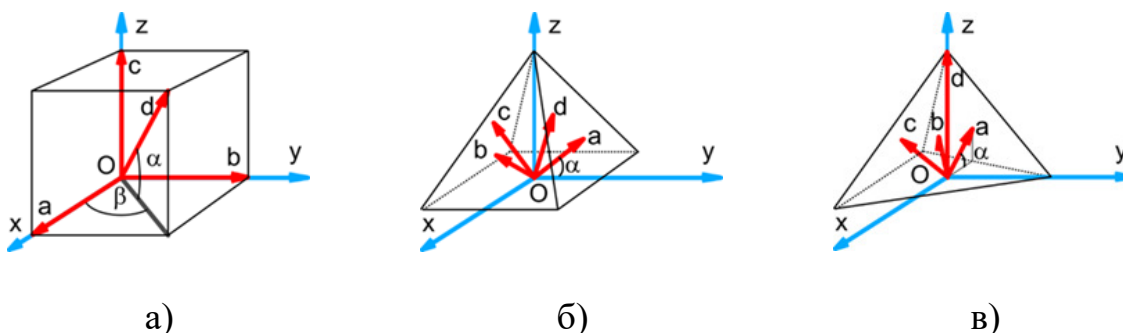


Рис.4. –Направление измерительных осей четырехосного гироскопического блока:

**а) конструкция 1: $\alpha \approx 35,3^\circ$, $\beta = 45^\circ$; б) конструкция 2: $\alpha \approx 35,3$;
в) конструкция 3 $\alpha \approx 19,5^\circ$.**

В таблице 1 представлены рассчитанные по (5) величины шума в процентном отношении от величины шума отдельного датчика для каждого варианта расположения осей.

Таблица 1 – Результаты расчета эффекта от комплексования МНК

		Все оси работают исправно	Отсутствует информация по оси			
			a	b	c	d
К. 1	Ось X	-9 %	+123 %	0 %	0 %	0 %
	Ось Y	-9 %	0 %	+123 %	0 %	0 %
	Ось Z	-9 %	0 %	0 %	+123 %	0 %
К. 2	Ось X	-13 %	+50 %	-13 %	+50 %	-13 %
	Ось Y	-13 %	-13 %	+50 %	-13 %	+50 %
	Ось Z	-13 %	+23 %	+23 %	+23 %	+23 %
К. 3	Ось X	-13 %	-13 %	+12 %	+66 %	+12 %
	Ось Y	-13 %	-13 %	+50 %	-13 %	+50 %
	Ось Z	-13 %	+73 %	0 %	0 %	0 %

Получены зависимости частоты и величины деформаций резонатора второй моды собственных колебаний от соотношения геометрических параметров изделия.

Применение четвертой измерительной оси позволяет уменьшить шум гироскопического блока до 13 % при использовании метода наименьших квадратов. Но из-за конструктивных особенностей расположения осей шум увеличивается при поломке одной из четырех измерительных осей. Увеличение может быть более чем в два раза (конструкция 1).

Анализ результатов расчетов (таблица 1) показали, что вариант 2 наиболее применим в навигационной системе. Он обеспечивает в случае исправной работы гироскопического блока уменьшение шума на 13 %. При этом в случае поломки одной из осей ТВГ критического повышения шума не произойдет.

Определен эффективный угол между измерительными осями и основанием пирамиды, равный $35,265^\circ$. Этот угол должен учитываться при разработке четырехосевого гироскопического блока, как оптимальный.

Проведенное исследование также позволяет выявить разницу между вторым и третьим вариантом расположения осей. Несмотря на одинаковую эффективность в исправном состоянии, при расположении осей по нормальям трехгранной пирамиды блок не работает эффективно при поломке.

По результатам аналитических расчетов были проведены также численные эксперименты, которые подтвердили применимость сделанных выводов для практики.

Библиографический список

1. Храмов Д.А. Миниатюрные спутники стандарта CubeSat / Д.А. Храмов // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15. № 3. – С. 20-31.
2. Волчихин И.А. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) / И. А. Волчихин, А. И. Волчихин, Д. М. Малютин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-2. – С. 59–78.
3. Журавлев В.Ф. Волновой твердотельный гироскоп / В.Ф. Журавлев, Д.М. Климов. – Москва: Наука, 1985. – 125с.
4. Senkal Doruk 1 million q-factor demonstrated on micro-glassblown fused silica wineglass resonators with out-of-plane electrostatic transduction / Doruk Senkal, Mohammed Ahamed, Sina Askari, A.M. Shkel // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2014. – 24(1). – pp. 68-71. 10.31438/trf.hh2014.18.
5. Su Zhong Research on Bell-Shaped Vibratory Angular Rate Gyro's Character of Resonator / Zhong Su, Mengyin Fu, Qing Li, Ning Liu, Hong Liu // Sensors. – 2013. – No.13. – pp. 4724-474
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – Москва: Мир, 1975. – 541 с.
7. Башарова А.А. Технологические подходы к обработке деталей из кварцевого стекла / А.А. Башарова, М.А. Котельников, А.В. Щенятский // Вестник современных технологий. – 2020. – № 4(20). – С. 19-23. – EDN GDOWXW.
8. Басараб М.А. Миниатюрные волновые твердотелные гироскопы для малых космических аппаратов / М.А. Басараб, Б.С. Лунин, В.А. Матвеев, А.В. Фомичев, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин // Вестник Московского Государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия приборостроение. – 2014. – Vol. 4. – pp. 80-96.

9. Вихляев И.А. Изменение точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов при отстройке частоты возбуждения от резонансной / И.А. Вихляев, К.В. Шишаков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19. № 4. – С. 4–17. – EDN IUSBXW.
10. Негри С. Новое поколение инерциальных навигационных систем на основе ВТГ для аппаратов, обеспечивающих запуск спутников / С. Негри, Э. Лабарр, К. Линьон, Э. Брунштейн, Э. Салаён, // Гироскопия и навигация – 2016. – Т. 24. № 1 (92) – С. 49–59. – EDN VSAQUI.

Bibliograficheskiy spisok

1. Hramov D.A. Miniaturnye sputniki standarta CubeSat / D.A. Hramov // Kosmichna nauka i tekhnologiya. – 2009. – Т. 15. № 3. – С. 20-31.
2. Volchihin I.A. Volnovye tverdotel'nye giroskopy (analiticheskiy obzor) / I. A. Volchihin, A. I. Volchihin, D. M. Malyutin [i dr.] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2017. – № 9-2. – С. 59–78.
3. ZHuravlev V.F. Volnovoy tverdotel'nyy giroskop / V.F. ZHuravlev, D.M. Klimov. – Moskva: Nauka, 1985. – 125s.
4. Senkal Doruk 1 million q-factor demonstrated on micro-glassblown fused silica wineglass resonators with out-of-plane electrostatic transduction / Doruk Senkal, Mohammed Ahamed, Sina Askari, A.M. Shkel // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2014. – 24(1). – pp. 68-71. 10.31438/trf.hh2014.18.
5. Su Zhong Research on Bell-Shaped Vibratory Angular Rate Gyro's Character of Resonator / Zhong Su, Mengyin Fu, Qing Li, Ning Liu, Hong Liu // Sensors. – 2013. – No.13. – pp. 4724-474
6. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike / O. Zenkevich. – Moskva: Mir, 1975. – 541 s.
7. Basharova A.A. Tekhnologicheskie podhody k obrabotke detalej iz kvarceвого стекла / A.A. Basharova, M.A. Kotel'nikov, A.V. SHCHenyatskiy // Vestnik sovremennykh tekhnologij. – 2020. – № 4(20). – С. 19-23. – EDN GDOWXW.
8. Basarab M.A. Miniaturnye volnovye tverdotel'nye giroskopy dlya mal'kh kosmicheskikh apparatov / M.A. Basarab, B.S. Lunin, V.A. Matveev, A.V. Fomichev, E.A. SHumankin, A.V. YUrin // Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya priborostroenie. – 2014. – Vol. 4. – pp. 80-96.
9. Vihlyayev I.A. Izmenenie tochnostnykh harakteristik tverdotel'nykh volnovykh giroskopov pri otstrojke chastoty vzbuzhdeniya ot rezonansnoj / I.A. Vihlyayev, K.V. SHishakov // Intelektual'nye sistemy v proizvodstve. – 2021. – Т. 19. № 4. – С. 4–17. – EDN IUSBXW.
10. Negri S. Novoe pokolenie inercial'nykh navigacionnykh sistem na osnove VTG dlya apparatov, obespechivayushchih zapusk sputnikov / S. Negri, E. Labarr,

К. Lin'on, E. Brunshtejn, E. Salayon, // *Giroskopiya i navigaciya* – 2016. – Т. 24. № 1 (92) – S. 49–59. – EDN VSAQUI.

¹*Измestьев Иван Дмитриевич, магистрант, i.d.izmestev@mail.ru, Россия, Ижевск, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова*

²*Щенятский Алексей Валерьевич, д.т.н., профессор, bkkupol@istu.ru, Россия, Ижевск, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова*

SENSORS OF THE FOUR-AXIS GYROSCOPIC UNIT AND THE AMOUNT OF NOISE

I.D. Izmestyev, A.V. Schenyatsky

The variants of the arrangement of the axes of the gyroscopic unit, which includes four sensing elements of solid-state wave gyroscopes as sensors, are considered. The least squares method has determined the positive effect of combining redundant information in cases of serviceable and emergency operation. The simulation of the operation of sensitive elements is carried out and the first modes of oscillations are considered. The effective angles determining the location of the measuring axes in the coordinate system of the gyroscopic unit are determined.

Keywords: HRG, gyroscope, redundancy, aggregation, least squares method, sensing element, oscillation mode

Izmestyev Ivan Dmitrievich, master's student, i.d.izmestev@mail.ru, Izhevsk, Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, Russia

Shenyatsky Alexey Valeryevich, doctor of technical sciences, professor, bkkupol@istu.ru, Izhevsk, Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, Russia

РАСПОЗНАВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Осипов К.Н.¹, Новиков В.В.²

***Аннотация.** Предлагается подход к распознаванию технических состояний машиностроительных изделий общетехнического назначения, используя методологию искусственных сверточных нейронных сетей. Новизна предлагаемого подхода заключается в применении в качестве ядра свертки набора нелинейных фильтров, минимизирующих информационное расхождение между исходной и редуцированной матрицей диагностических признаков технических состояний.*

***Ключевые слова.** Моделирование, диагностика, объектно-событийное моделирование.*

Задачи достоверного оценивания технических состояний конструктивно сложных изделий общетехнического машиностроения в ходе их эксплуатации, а также в ходе производственных испытаний, например, приемосдаточных или контрольных являются по-прежнему актуальными и значимыми, особенно, когда оценивание пригодности изделий к условиям будущей эксплуатации реализуется в условиях недостатка априорной информации об объектах испытаний и производственных процессах [1,2,3]. При этом под процедурой оценивания технических состояний понимают процедуру определения способности изделия выполнять свои функции по результатам измерений некоторого множества диагностических параметров [3,4]. Таким образом, в ходе реализации процедуры оценивания технических состояний приходится иметь дело с количественным анализом измерительных последовательностей, описывающих динамику технических состояний во времени. Результатом анализа является решение относительно наличия или отсутствия у объектов требуемых свойств, обеспечивающих их пригодность к дальнейшему применению. Инструментом анализа является модель, позволяющая сформировать оценку текущего состояния и выполнить прогнозирование списка будущих состояний, исходя из некоторых гипотез, например, исходя из гипотезы, что основные факторы и тенденции, имеющие место в прошлом периоде эксплуатации, сохраняются на период прогноза или что можно обосновать и учесть направление развития технических состояний в рассматриваемой перспективе [5]. Поэтому решение о годности изделий к эксплуатации предполагает наличие одной или нескольких моделей, которые должны зависеть от свойств объектов, целевого содержания прогнозирования и условий оценивания [6].

Обзор современной литературы показал, что в ходе эксплуатации решение задач оценивания технических состояний, используя средства математического моделирования, нередко, достигается использованием специализированных и упрощенные линейных модели, предъявляющих малые требования к вычислительным ресурсам и обеспечивающие высокое быстродействие систем поддержки принятия решений [4-8]. Однако такой подход не всегда позволяет обеспечить заданную точность результатов оценивания, особенно в условиях, когда неизвестными оказываются параметры шум-сигнальных составляющих в результатах измерений, а также истинные законы распределения плотностей вероятностей диагностических параметров для исправного и неисправных состояний. Разрешение указанных противоречий, связанных с необходимостью обеспечения заданной точности процедуры оценивания технических состояний конструктивно сложных изделий при минимизации вычислительных ресурсов может быть достигнуто рациональным применением искусственных нейронных сетей, построенных по принципу нахождения численных значений некоторого нелинейного функционала технического состояния, аргументом которого является взвешенная линейная комбинация диагностических параметров.

Целью работы является разработка подхода к построению искусственных нейронных сетей для оценивания технических состояний изделий машиностроения.

Формализуем задачу распознавания технических состояний машиностроительных изделий по результатам наблюдений диагностических параметров в дискретные моменты времени в следующем виде.

Пусть задан некоторый объект γ , а также некоторое (в общем случае возможно и бесконечное) число классов (технических состояний этого объекта) $\{\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n\}$, $n \in R^1$. Также, будем считать, что задано некоторое количество информации о классе в виде результата измерений $I_0(\{\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n\})$. Требуется построить вычислительный процесс Pr , определенный на всем множестве объектов γ , реализующий процедуру оценки принадлежности i -го объекта заданному классу $\gamma_i (i \in n)$.

С целью достижения практической реализуемости вычислительной процедуры примем, что входная информация о текущем техническом состоянии объекта представляет матрицу $A(t)$ размером $M \times N$. Каждая i -я строка в матрице $A(t)$ соответствует отдельному диагностическому параметру, количество столбцов в матрице равно количеству измерений. Двумерный формат исходных данных принят исходя из предположения о том, что двумерные (многомерные) методы анализа данных при решении задач обработки структурированной измерительной информации обладают значительно большей вычислительной устойчивостью в сравнении с одномерными методами [11]. Другими словами, входная информация представляет функцию $I_i(x_i, t_i)$, значение которой зависит от

численного значения x_i -го диагностического параметра в дискретный момент времени t_i . Представление входной информации в матричном виде позволяет построить вычислительную процедуру Pr решения задачи распознавания технического состояния в терминах искусственных сверточных нейронных сетей [11].

Разделим задачу распознавания технических состояний на две подзадачи. Первая подзадача связана с формированием алгоритма редуцирования исходных данных и выявления в редуцированной матрице главных компонент, в том числе на фоне шумов. Вторая подзадача связана с построением алгоритма классификации по результатам редуцирования и выделения главных компонент в исходной информации. Решение первой задачи предлагается формировать в виде взвешенной комбинации нелинейных фильтров свертки с адаптивным информационным фильтром, впервые предложенным в работе [10]. Решение второй подзадачи предлагается строить на базе полно-связной нейронной сети обратного распространения, ядром которой является адаптивный персептрон. С технической точки зрения наибольший интерес представляет процесс выявления в редуцированной матрице главных компонент информации о наличии или отсутствии признаком технического состояния, используя набор нелинейных фильтров, каждый из которых в отдельности реализует процесс выявления некоторого шаблонного значения в поступающей на его вход информации. При этом, с целью препятствия переобучению, каждая пара фильтров должна быть разделена дополнительным фильтром, реализующим функцию регуляризации.

Аналитически свертка исследуемого сигнала на каждом шаге вычислительной процедуры каждым отдельным фильтром представляет следующее выражение:

$$\mathcal{G}_i = w_0 + \sum_{k=1}^n w_{jk} y_{k,j} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n w_{l,k} y_k y_l + \sum_{r=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n w_{l,k,r} y_k y_l y_r + \dots (1)$$

В уравнении (1) $y_{k,i}$ значение отдельно взятой координаты в входном сигнале, расположенной на пересечении, например, k -й строки и j -го столбца, w ядро свертки.

Учитывая (1), в вычислительном аспекте процедура свертки связана с построением алгоритма отыскания численных значений ядра свертки w .

Из выражения (1) следует, что свертка (трансформация) в математическом понимании представляет преобразование исходных данных в собственное подпространство признаков при выполнении условия минимальной ошибки аппроксимации. Поэтому оптимальной будем считать процедуру аппроксимации и выделения главных компонент из класса линейных оценок, параметры распределения которой максимально близки к параметрам распределения истинного значения сигнала, что количественно может быть оценено, используя направленную дивергенцию Кульбака-Лейблера [9]. Тогда алгоритм фильтрации

должен быть ориентирован на отыскание распределения, минимизирующего информационное расхождение

$$J(g, f) = I(g, f) + I(f, g), \quad (2)$$

где $I(g, f) = \int_E g(x, y) \ln \frac{g(x, y)}{f(x, y)} d\lambda(x, y)$ - информация о степени близости исходного сигнала с плотностью распределения $g(x, y)$ и редуцированного сигнала, с плотностью распределения $f(x, y)$.

При нормальном распределении плотностей вероятности исходного и, как следствие, преобразованного сигнала выражение для натурального логарифма отношения $\frac{g(x, y)}{f(x, y)}$, входящего в (2), имеет вид [3, 11]:

$$\ln \frac{g(x, y)}{f(x, y)} = \frac{1}{2} \ln \frac{|\hat{\Sigma}|}{|\Sigma|} - \frac{1}{2} \text{tr}[\Sigma^{-1}(\mathbf{m}_{x,y} - q_{x,y})(\mathbf{m}_{x,y} - q_{x,y})^T] + \frac{1}{2} \text{tr}[\hat{\Sigma}^{-1}(\mathbf{m}_{x,y} - \hat{q}_{x,y})(\mathbf{m}_{x,y} - \hat{q}_{x,y})^T]$$

Здесь $q_{x,y}$ усредненное значение сигнала.

Подстановка этого выражения в (2) дает

$$J(g, f) = \frac{1}{2} \text{tr}[(\Sigma - \hat{\Sigma})(\hat{\Sigma}^{-1} - \Sigma^{-1})] + \frac{1}{2} \text{tr}[(\Sigma^{-1} - \hat{\Sigma}^{-1})(q_{x,y} - \hat{q}_{x,y})(q_{x,y} - \hat{q}_{x,y})^T].$$

В предположении равенства математических ожиданий исходного и преобразованного изображений, например, равенстве их нулю (при нормализации и центрировании) последнее выражение принимает вид:

$$J(g, f) = \frac{1}{2} \text{tr}[(\Sigma - \hat{\Sigma})(\hat{\Sigma}^{-1} - \Sigma^{-1})]. \quad (3)$$

Для определения w как аргумента функции информационного расхождения (3), сообщающего ей минимальное значение, используем метод наискорейшего спуска. Если $w^{(0)}$ - начальная оценка матрицы w , например, определенная случайным образом, то для $i = 1, 2, 3, \dots$ имеем

$$W \downarrow^{(i+1)} = W \downarrow^{(i)} - \lambda^{(i)} \frac{\partial J(g, f)}{\partial W \downarrow} \Big|_{W=W(i)}. \quad (4)$$

Градиентный член $\frac{\partial J(g, f)}{\partial W}$ выражения (4) есть производная матричной функции $J(g, f)$ по матричному аргументу W . Процесс оптимизации ядра фильтра W прекращается, когда его значения стабилизируются.

Методами функционального анализа проверена выпуклость функции $J(g, f)$. Сходимость алгоритма оценивается для конкретных систем численным моделированием на ЭВМ.

Дальнейшие исследования могут быть связаны со снятием требования о нормальном распределении исследуемых векторов.

Библиографический список

1. Шульгин А.Ф. Технологические газовоздушные 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. Испытания ДВС: Учебное пособие. / А.С. Лоскутов, А.Н. Григорьев, Д.В. Кожин. – Йошкар-Ола: Марийский ГТУ, 2007. – С. 136.
3. 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. Моделирование измерительных последовательностей диагностических параметров ДВС / В.В. Голикова, Е.Л. Первухина, П.К. Сопин // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – №2. – С 114 – 117.
7. 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. – pp.69-89.
8. Marko K.A. Automotive Control System Diagnostics Using Neural ~ets for Rapid Classification of Large Data Sets / K.A. Marko, J. James, J. Dossdall, J. Murphy // Proceedings DCNN, 11-13, Washington, D.C., 1989.
9. Haykin S. Unsupervised Adaptive Filtering / S. Haykin, ed. – Vol.I. Blind Source Separation. – John Wiley&Sons, Inc., 2000. – 445 p.
10. Хайкин С. Нейронные сети / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1103 с.
11. Кульбак С. Теория информации и статистика / С. Кульбак. – М.: Наука, 1967. – 408 с.
12. Harville D.A. Matrix Algebra from a Statistician's Perspective / D.A. Harville. – Springer-Verlag, New York, 1997. – 630 p.

Bibliograficheskiy spisok

1. SHul'gin A.F. Tekhnologicheskie gazovozdushnye sistemy stendov eksperimental'noj ispytatel'noj bazy aviacionnyh dvigatelej i energeticheskikh ustanovok / A.F. SHul'gin, YU.I. Pavlov, V.G. Popov, V.V. Kulakov. – М.: МАТИ, 2009. – 384 с.
2. Loskutov A.S. Ispytaniya DVS: Uchebnoe posobie. / A.S. Loskutov, A.N. Grigor'ev, D.V. Kozhin. – Joshkar-Ola: Marijskiy GTU, 2007. – S. 136.

3. 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.
5. Golikova V.V. Identifikaciya stohasticheskikh ob"ektov i processov v avtomatizirovannoj sisteme proizvodstvennyh priemosdatochnyh ispytaniy dvigatelej vnutrennego sgoraniya. dis. kand. tekhn. nauk po special'nosti 05.13.07 / Golikova Viktoriya Viktorovna. – Sevastopol': SevNTU – 2008 g. – 205 s.
6. Golikova V.V. Modelirovanie izmeritel'nyh posledovatel'nostej diagnosticheskikh parametrov DVS / V.V. Golikova, E.L. Pervukhina, P.K. Sopin // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2012. – №2. – S 114 – 117.
7. 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. – pp.69-89.
8. Marko K.A. Automotive Control System Diagnostics Using Neural ~ets for Rapid Classification of Large Data Sets / K.A. Marko, J. James, J. Dossdall, J. Murphy // Proceedings DCNN, 11-13, Washington, D.C., 1989.
9. Haykin S. Unsupervised Adaptive Filtering / S. Haykin, ed. – Vol.I. Blind Source Separation. – John Wiley&Sons, Inc., 2000. – 445 p.
10. Hajkin S. Nejrornyie seti / S. Hajkin. – M.: Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2006. – 1103 s.
11. Kul'bak S. Teoriya informacii i statistika / S. Kul'bak. – M.: Nauka, 1967. - 408 c.
12. Harville D.A. Matrix Algebra from a Statistician's Perspective / D.A. Harville. – Springer-Verlag, New York, 1997. – 630 p.

Осипов Константин Николаевич, к.т.н., старший научный сотрудник НИЛ-1 Черноморского высшего военно-морское училища, Севастополь

Новиков Владимир Витальевич, д.т.н., профессор, Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С. Нахимова, Севастополь

FAULTS RECOGNITION OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS

K.N. Osipov, V.V. Novikov

An approach is proposed to recognize the technical conditions of engineering products for general technical purposes, using the methodology of artificial convolutional neural networks. The novelty of the proposed approach lies in the use of a set of nonlinear filters as a convolution kernel, minimizing the information discrepancy between the original and reduced matrix of diagnostic features of technical conditions. The issues of forming the rules for constructing an output classifier in the form of a fully connected neural network are not considered within the framework of this work, since they are considered trivial.

Key words: modeling, diagnostics, object-event modeling.

Osipov Konstantin Nikolaevich, candidate of technical sciences, senior researcher at NIL-1 of the Black Sea Higher Naval School, Sevastopol

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №4(20) 2022 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

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 23.12.2022. Заказ 018К. Дата выхода в свет: 30.12.2022. Тираж: 50 экз.
Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 13,48.

Севастополь, 2022