

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№2(22)
2023

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, 2023

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

Копп В.Я., Липка В.М. Исследование параметров деталей с резьбой для автоматизированной сборки резьбовых соединений 3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Бохонский А.И., Варминская Н.И. Оптимальное движение антропоморфного манипулятора в морской среде 13

Обжерин Ю.Е., Сидоров С.М., Федоренко С.Н. Приближенное нахождение характеристик надежности системы с поэлементным резервом времени 24

Скатков И.А., Осипов К.Н. Модель динамической взаимосвязи между коэффициентом топливной коррекции и уровнем токсичности поршневых двигателях внутреннего сгорания 40

Карташов Л.Е. Имитационная модель участка гибкой автоматической линии с накопителем в виде лотка с активным ориентирующим устройством 52

Цуканов А.В. Применение технологии RPA для анализа рынка технологического оборудования 61

Копп В.Я., Заморёнов М.В., Чаленков Н.И. Оптимизация параметров системы с последовательным соединением производственных элементов 71

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Поливцев В.П., Поливцев В.В., Балакин А.И. Исследование процесса насыщения газом жидкости в замкнутом контуре аппарата жидкостного дыхания 77

Балакина Н.А., Балакин А.И. Влияние температурных деформаций звеньев измерительной руки на погрешность координатных измерений 97

УДК 685.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ С РЕЗЬБОЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Копп В.Я.¹, Липка В.М.²

***Аннотация.** Рассматриваются задачи обеспечения качества и надежности высоконагруженных резьбовых соединений в составе сложных изделий, выпускаемых машиностроением и другими производственными отраслями. Оценивается влияние различных факторов, проявляющихся на этапах жизненного цикла резьбовых соединений, на качество и надежность изделий при эксплуатации. Анализируются результаты исследований параметров крепежных деталей с резьбой и их влияние на качество сборки резьбовых соединений. Полученные результаты могут быть использованы на предприятиях, осуществляющих сборку высоконагруженных соединений из резьбовых деталей.*

***Ключевые слова.** Автоматизированная сборка, надежность резьбовых соединений, резьбосборочное оборудование, этапы жизненного цикла резьбовых соединений.*

Введение.

Качество изделий машиностроения, станкостроения, приборостроения, судостроения, авиастроения, строительной индустрии и других производственных отраслей в значительной мере определяется надежностью высоконагруженных резьбовых соединений (ВРС), механизированная и автоматизированная сборка которых широко применяется в современной промышленности [1]. Отличием ВРС среди всех соединений, применяемых при сборке сложных изделий, является их особая роль в обеспечении надежности продукции производственных отраслей. Раскрытие всего одного стыка с ВРС приводит, как правило, к аварийному отказу изделия и дорогостоящему ремонту. В частности, отказы ВРС в изделиях автомобильной промышленности являются причиной 2-3% от общего количества всех дорожно-транспортных происшествий и приводят к значительному материальному ущербу и травмированию людей. На **Рис.1** приведена предложенная авторами классификация отказов ВРС в автомобильных силовых агрегатах.

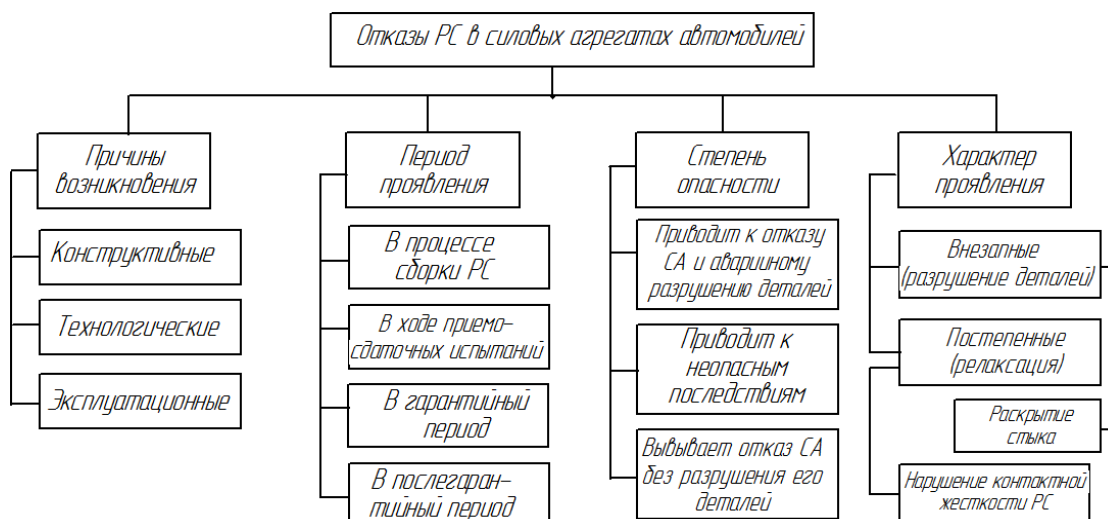


Рис.1 – Классификация отказов резьбовых соединений в силовых агрегатах автомобилей

Несмотря на значительные достижения в области изготовления деталей с резьбой и развитие технических средств для механизации и автоматизации сборки ВРС, отказы продукции машиностроения и других отраслей по причинам раскрытия стыка из-за релаксации некачественно изготовленных соединений, фреттинга, внезапного и постепенного разрушения резьбовых деталей, по различным данным, составляют на этапе эксплуатации 15...30% от количества эксплуатируемых изделий [2,3]. Кроме того, отказы ВРС на этапах сборки и в ходе приемо-сдаточных испытаний могут обнаруживаться в 8-10% изделий от объема производства [4]. Учитывая, что сложные, дорогостоящие изделия, такие, как силовые агрегаты автомобилей, судовые энергетические установки, электрические, гидравлические и пневматические машины различного назначения, как правило, являются ремонтпригодными, дефекты ВРС в них проявляются также в процессе ремонта и сборки после него, а также на этапах приемо-сдаточных испытаний и последующей эксплуатации.

Исследование и моделирование процессов изготовления деталей с резьбой и сборки ВРС существенно осложняются тем, что все указанные процессы являются стохастическими, в них также имеет место последствие, которое наиболее существенно проявляется в форме технологической наследственности [5–8]. В ряде публикаций [9–13] предложены полумарковские математические модели, в достаточной мере адекватно описывающие взаимосвязь последовательных этапов жизненного цикла ВРС в составе сложных изделий, изготовленных на предприятиях машиностроения либо других отраслей промышленности.

Вместе с тем, все известные математические модели, в т.ч. стохастические и имитационные, описывающие процессы изготовления деталей с резьбой и сборки ВРС, требуют в качестве исходных данных результаты статистических наблюдений, полученные в ходе экспериментов либо путем анализа экспериментальных данных, опубликованных в литературных источниках.

Задачи исследований.

1. Экспериментально установить взаимосвязь факторов, проявляющихся при автоматизированной сборке ВРС, и оценить степень их влияния на качество соединений.

2. Сформулировать методы применения экспериментальных результатов для повышения качества и надежности ВРС.

Основная часть.

Рассмотрим влияние точностных характеристик РД на параметры, определяющие точность расчета крутящего момента, необходимого для создания расчетного усилия затяжки при сборке ВРС.

При расчете необходимого момента создания расчетного усилия затяжки первостепенное значение имеет правильное назначение коэффициента трения f_p , но он случайным образом зависит от сочетания таких факторов, как отношение площадей контакта витков резьбы, от наличия и свойств смазки, от удельного давления витков, которое, в свою очередь, нелинейно зависит от площади контакта, от шероховатости РД, от зазора в соединении и ряда других факторов [1,3,4]. Методика точного аналитического расчета значений коэффициента трения f_p для различных условий не разработана.

Разброс величины внутреннего диаметра резьбы винта М10х1,25 от $d_{1_{\min}}=8,015$ до $d_{1_{\max}}=8,29$ мм ($\Delta d_1=0,275$ мм) приводит к ошибке расчетного усилия затяжки в пределах $\pm 6,5\%$. Такое изменение внутреннего диаметра приводит к погрешности усилия затяжки ВРС даже при прямом измерении деформации тела винта в пределах $\pm 10\%$. Аналогичные исследования были проведены для группового ВРС крышек коренных подшипников коленчатого вала четырехцилиндрового автомобильного двигателя ВАЗ, содержащего 10 болтов М10х1,25, результаты совпадают в пределах точности эксперимента.

При проведении эксперимента по изучению влияния различных технологических факторов на величину момента затяжки ВРС в условиях автоматизированного производства, учитывались результаты анализа точности изготовления деталей с резьбой [3,4] на основании которого были выбраны условия проведения экспериментальных исследований.

В качестве варьируемых факторов для проведения эксперимента были выбраны следующие параметры: напряжение после затяжки, рабочая высота профиля резьбы, зазор по среднему диаметру и скорость затяжки, создаваемая гайковертом. Внешний вид установки, на которой проводился эксперимент, приведен на **Рис.2**.

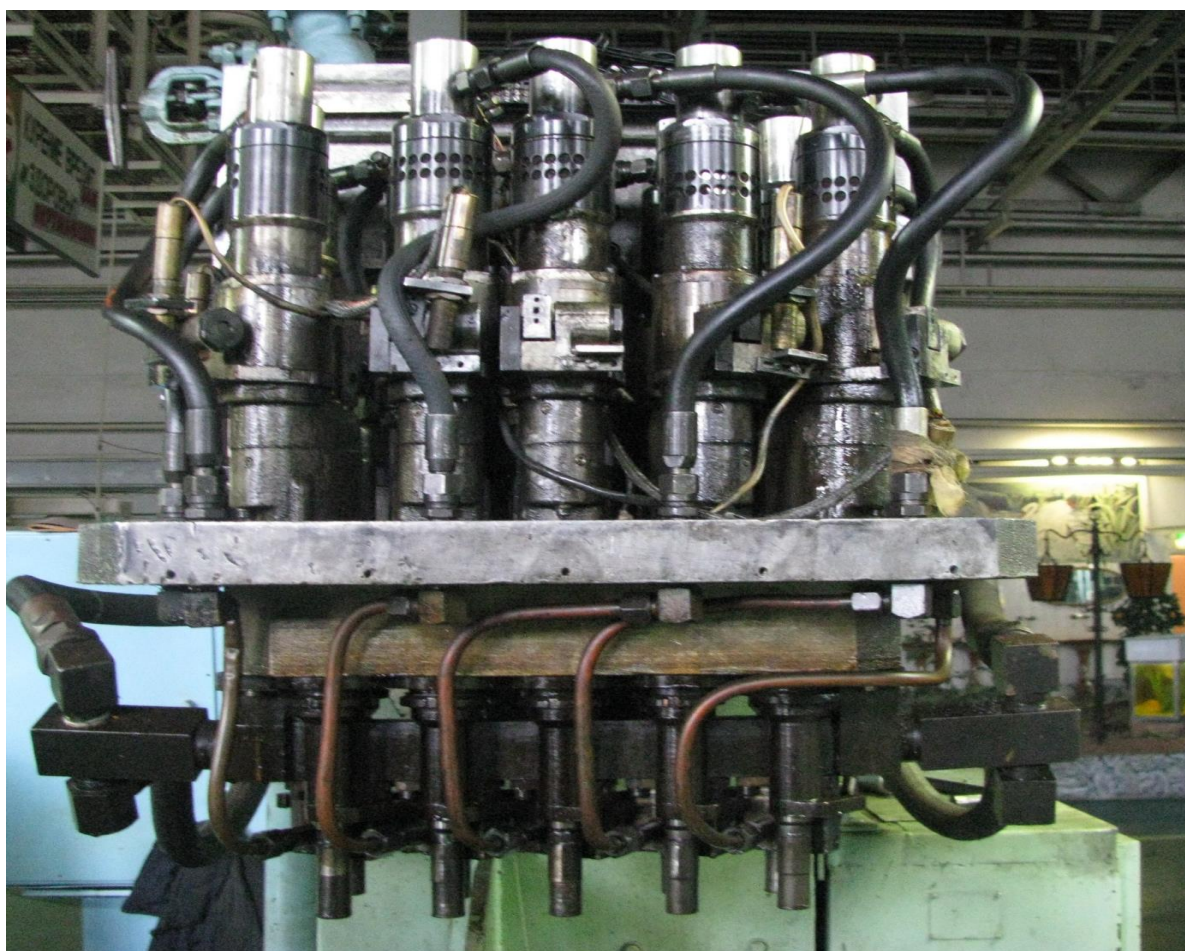


Рис.2 – Установка для проведения эксперимента по контролю равномерности затяжки группового ВРС и исследованию влияния различных факторов на величину момента затяжки

Из многочисленных публикаций [3,4,15,16] известно, что взаимное и совместное влияние указанных факторов крайне сложно описать аналитическими функциональными зависимостями, поэтому представляется целесообразным построение регрессионных моделей по результатам экспериментальных исследований. Основные факторы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки массива экспериментальных данных

№	$\bar{y}$	$S_{\{y\}}^2$	Значимость факторов и коэффициенты уравнения			$\tilde{y}$	$(\bar{y} - \tilde{y})^2$
1	10,03	2,0479	b_0	23,8919	зн	9,15	0,7755
2	26,13	2,1127	b_1	6,8594	зн	25,47	0,4356
3	10,01	2,8276	b_2	-1,2993	зн	8,01	4,0
4	20,95	3,3424	b_3	5,7281	зн	21,41	0,2116
5	22,85	5,0179	b_4	3,1519	зн	23,33	0,2304
6	30,99	3,9225	b_{12}	0,1431	незн	30,21	0,6084
7	19,39	4,6137	b_{13}	-1,6343	зн	19,17	0,0484
8	30,57	3,9313	b_{14}	-1,0644	зн	31,19	0,3844
9	12,41	2,4271	b_{23}	-0,1656	незн	13,33	0,8464
10	32,62	2,1612	b_{24}	-0,1644	незн	33,99	1,6129
11	10,23	1,4448	b_{34}	0,1431	незн	12,19	3,8416
12	30,93	2,3769	b_{123}	0,5269	незн	29,83	1,210
13	28,61	4,5637	b_{124}	0,4081	незн	27,51	1,210
14	37,89	2,6257	b_{134}	-0,5994	незн	38,63	0,5329

В расчетах были использованы общеизвестные методики регрессионного анализа, с помощью которых получено уравнение регрессии для резьбы М10х1,25:

$$\tilde{y} = 23,89 + 6,86X_1 - 1,3X_2 + 4,75X_3 + 3,15X_4 - 1,63X_1X_3 + 1,06X_1X_4 \quad (1)$$

Проверка уравнения по критерию Кохрена показала, что дисперсии всех коэффициентов уравнения однородны при уровне значимости $\alpha = 5\%$. Как видно из (1), на момент затяжки ВРС $M(Y)$ наибольшее влияние оказывают такие факторы, как напряжение затяжки $\sigma_3(X_1)$, рабочая высота профиля резьбы $H(X_3)$ и зазор по среднему диаметру $S(X_4)$. Кроме того, существенно влияние скорости затяжки $V(X_2)$. Влияние указанных факторов определяется соотношением:

$$X_1 : X_2 : X_3 : X_4 = 41 : 9 : 27 : 23 \quad (2)$$

Соотношение влияния факторов на величину момента затяжки

подтверждает предположения о значительном влиянии технологических факторов на точность затяжки ВРС, а также на необходимость их контроля при автоматизированной сборке.

Коэффициенты уравнения (1) позволяют оценить факторы, влияющие на величину момента затяжки, что необходимо в дальнейшем для моделирования процесса сборки ВРС с помощью полумарковских моделей [2,9,13]. Таким образом, в порядке убывания значимости, наибольшее влияние на процесс сборки оказывают: величина напряжения затяжки σ_3 , высота профиля резьбы H и зазор по среднему диаметру S .

Используя известную зависимость

$$x_i = \frac{X_i - X_{io}}{\Delta X_i},$$

где x_i — кодированное значение факторов; X_i — натуральное значение факторов; X_{io} — натуральное значение основного уровня; ΔX_i — интервал варьирования; i — номера факторов, для перехода от кодированных значений факторов к их натуральным величинам, уравнение регрессии (1) можно записать в следующем виде

$$M = 0,13\sigma_3 - 260V + 68,72H + 2,18\sigma_3 H + 0,03\sigma_3 S - 29,1. \quad (3)$$

Анализируя (3), можно отметить, что возрастание величины напряжения затяжки σ_3 , высоты рабочего профиля резьбы H и зазора по среднему диаметру S существенно увеличивают момент затяжки. Увеличение скорости затяжки V уменьшает величину момента затяжки, необходимую для создания плотного стыка. Однако, следует отметить, что уравнение (3) адекватно описывает процесс затяжки ВРС только в выбранной области определения факторов.

Анализируя результаты эксперимента, можно отметить, что, как и при трении плоских поверхностей, момент трения уменьшается с увеличением скорости скольжения [1], возрастание рабочей высоты профиля витка резьбы влечет за собой увеличение момента трения как следствие увеличения площади контакта трущихся поверхностей. При этом полученные зависимости отражают характер изменения величины момента затяжки от влияния технологических факторов, однако имеют различные степени этого влияния при сравнении с трением плоских поверхностей, что можно объяснить специфичностью процессов трения, возникающих между витками резьбы гайки и винта при затяжке ВРС.

Уравнение (1) и соотношение (2) можно использовать при автоматизации процесса затяжки, когда управление автоматизированной линией сборки ВРС осуществляется от компьютерной системы. Таким

образом, зная величину влияния изменения значения каждого фактора и предельно допустимые отклонения момента затяжки от расчетной величины, необходимой для создания плотного стыка, можно технически обоснованно гарантировать соблюдение точности затяжки ВРС при контроле по крутящему моменту на компьютеризированном резьбосборочном оборудовании, управляемом

Выводы.

1. Резьбовые детали, применяемые в настоящее время при сборке ответственных ВРС в изделиях машиностроения, более, чем в 13% случаев не позволяют обеспечить выполнение требований конструкторской документации.

2. Изменение рабочей высоты профиля резьбы приводит к изменению площади контакта одного витка резьбы в соединении от $F_{K_{\min}} = 15,021 \text{ мм}^2$ до $F_{K_{\max}} = 26,163 \text{ мм}^2$, что вызывает изменение удельного давления на витке резьбы в пределах $\pm 32\%$, существенно снижая точность достижения расчетного усилия затяжки.

3. Разброс величины внутреннего диаметра резьбы болтов М10 $\Delta d_1 = 0,275 \text{ мм}$ приводит к ошибке расчетного усилия затяжки в пределах $\pm 6,5\%$.

Библиографический список

1. Холодкова А.Г. Технология автоматической сборки / А.Г. Холодкова, М.Г. Кристаль, Б.Л. Штриков и др. – М.: Машиностроение, 2010 – 560 с.
2. Rapatskiy Yu. Research of reliability and efficiency of technological processes of mechanical assembly production on the basis of the common semi-Markov model / Yu. Rapatskiy, M. Zamorenov, V. Kopp, Yu. Obzherin, V. Gusev, V. Lipka // MATEC Web of Conferences 224. – 2018. – 01138 (2018), ICMTMTE 218 – P.1-8.
3. Биргер И.А. Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
4. Петриков В.Г. Прогрессивные крепежные изделия / В.Г. Петриков, А.П. Власов. – М.: Машиностроение, 1991. – 256 с.
5. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684с.
6. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
7. Хейфец М.Л. Математическое моделирование технологических процессов / М.Л. Хейфец. – Новополюцк: ПГУ, 1999. – 104с.
8. Липка В.М. Анализ воздействия технологической наследственности

-
- при изготовлении деталей с резьбой на надежность резьбовых соединений в судовых машинах и механизмах/ В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Ушаковские чтения: Материалы Пятой Межвузовской научно-практической конференции. – 2018. – с.61-69
9. Zamoryonov M. Simulation of a Single-Component System Using the Trajectories Method Taking into Account the Scheduling Preventive Maintenance / M. Zamoryonov, V. Kopp, O. Chengar, Yu. Rapatskiy // Advances Intelligent Systems and Computing /Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. Proceeding of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC-2017). – 2017. – vol.2. – p.264-271.
10. Obzherin Yu.E. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures / Yu.E. Obzherin, Ye.G. Boyko. – Elsevier, Academic press, USA, 2015. – 214 p.
11. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
12. Gámiz M.L. Reliability of Semi-Markov Systems. In: Applied Nonparametric Statistics in Reliability / M.L. Gámiz, K.B. Kulasekera, N. Limnios, B.H. Lindqvist. – Springer Series in Reliability Engineering. Springer, London, 2011. – 230 p.
13. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем. / В.Я. Копп. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 700 с.
14. Липка В.М. Повышение надежности резьбовых соединений при сборке автомобильных силовых агрегатов / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Высокие технологии в машиностроении. – 2012. – Вып.1 (22). – с. 199-210.
15. Киричек А.В. Резьбонакатывание.: Библиотека технолога / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
16. Якухин В.Г. Высокотехнологичные методы металлообработки.: Учебник / В.Г. Якухин. – М.: МГИУ, 2011. – 362 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Holodkova A.G. Tekhnologiya avtomaticheskoy sborki / A.G. Holodkova, M.G. Kristal', B.L. SHtrikov i dr. – М.: Mashinostroenie, 2010 – 560 s.
2. Rapatskiy Yu. Research of reliability and efficiency of technological processes of mechanical assembly production on the basis of the common semi-Markov model / Yu. Rapatskiy, M. Zamorenov, V. Kopp, Yu. Obzherin, V. Gusev, V. Lipka // MATEC Web of Conferences 224. – 2018. – 01138 (2018), ICMTMTE 218 – P.1-8.
3. Birger I.A. Rez'bovye i flancevye soedineniya / I.A. Birger, G.B. Iosilevich.

-
- М.: Mashinostroyeniye, 1990. – 368 s.
4. Petrikov V.G. Progressivnyye krepezhnyye izdeliya / V.G. Petrikov, A.P. Vlasov. – М.: Mashinostroyeniye, 1991. – 256 s.
 5. Suslov A.G. Nauchnyye osnovy tekhnologii mashinostroyeniya / A.G. Suslov, A.M. Dal'skiy. – М.: Mashinostroyeniye, 2002. – 684s.
 6. Suslov A.G. Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv detalej mashin i ih soedinenij / A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko i dr. – М.: Mashinostroyeniye, 2006. – 448 s.
 7. Hejfec M.L. Matematicheskoe modelirovaniye tekhnologicheskikh processov / M.L. Hejfec. – Novopolock: PGU, 1999. – 104s.
 8. Lipka V.M. Analiz vozdeystviya tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri izgotovlenii detalej s rez'boj na nadezhnost' rez'bovykh soedinenij v sudovykh mashinakh i mekhanizmah/ V.M. Lipka, YU.L. Rapackij // Ushakovskie chteniya: Materialy Pyatoy Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferencii. – 2018. – s.61-69
 9. Zamoryonov M. Simulation of a Single-Component System Using the Trajectories Method Taking into Account the Scheduling Preventive Maintenance / M. Zamoryonov, V. Kopp, O. Chengar, Yu. Rapatskiy // Advances Intelligent Systems and Computing /Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. Proceeding of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC-2017). – 2017. – vol.2. – p.264-271.
 10. Obzherin Yu.E. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures / Yu.E. Obzherin, Ye.G. Boyko. – Elsevier, Academic press, USA, 2015. – 214 p.
 11. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
 12. Gámiz M.L. Reliability of Semi-Markov Systems. In: Applied Nonparametric Statistics in Reliability / M.L. Gámiz, K.B. Kulasekera, N. Limnios, B.H. Lindqvist. – Springer Series in Reliability Engineering. Springer, London, 2011. – 230 p.
 13. Kopp V.YA. Modelirovaniye avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem. / V.YA. Kopp. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 700 s.
 14. Lipka V.M. Povysheniye nadezhnosti rez'bovykh soedinenij pri sborke avtomobil'nykh silovykh agregatov / V.M. Lipka, YU.L. Rapackij // Vysokie tekhnologii v mashinostroyenii. – 2012. – Vyp.1 (22). – s. 199-210.
 15. Kirichek A.V. Rez'bonakatyvaniye.: Biblioteka tekhnologa / A.V. Kirichek, A.N. Afonin. – М.: Mashinostroyeniye, 2009. – 312 s.
 16. YAkuhin V.G. Vysokotekhnologichnyye metody metalloobrabotki.: Uchebnik / V.G. YAkuhin. – М.: MGIU, 2011. – 362 s.

¹*Копп Вадим Яковлевич, д.т.н., профессор, v_kopp@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Липка Виктория Михайловна, доцент, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

**INVESTIGATION OF PARAMETERS OF THREADED PARTS FOR
AUTOMATED ASSEMBLY OF THREADED CONNECTIONS**

V.Ya. Kopp, V.M. Lipka

The problems of ensuring the quality and reliability of highly loaded threaded connections as part of complex products manufactured by mechanical engineering and other manufacturing industries are considered. The influence of various factors manifested at the stages of the life cycle of threaded connections on the quality and reliability of products during operation is evaluated. The results of studies of the parameters of threaded fasteners and their impact on the assembly quality of threaded connections are analyzed. The results obtained can be used at enterprises that assemble highly loaded connections from threaded parts.

Keywords: automated assembly, reliability of threaded connections, threading equipment, life cycle stages of threaded connections.

Kopp Vadim Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, v_kopp@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Lipka Victoria Mikhailovna, docent, VMLipka@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 621.865.8 : 517.97 : 51-74

ОПТИМАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА В МОРСКОЙ СРЕДЕ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.²

Аннотация. *Использован алгоритм решения полной обратной задачи вариационного исчисления для поиска управления типа «разгон-торможение» при переносном движении объекта. Принципиальное отличие – отсутствие предварительно задаваемого критерия оптимальности. С использованием углового ускорения (управления) исследовано оптимальное вращение консольного элемента антропоморфного манипулятора с учётом линейно-вязкого сопротивления морской среды. Движущие моменты найдены как решения обратной задачи динамики. И с учётом сопротивления движению возможна экономия энергии для достижения конечного состояния (по сравнению с известным классическим управлением).*

Ключевые слова. *Динамика вращения консоли, оптимальное ускорение, линейно-вязкое сопротивление, антропоморфный манипулятор, кинематические характеристики, движущие моменты.*

Введение. Теория оптимального управления движением и колебаниями упругих систем исследована в работах [1–7] и других.

Конструированию оптимальных управлений перемещением объектов как абсолютно твердых тел и деформируемых систем посвящены, например, работы [8–10]. Найден класс кососимметричных управлений, оптимальных в смысле существования восстановленных функционалов-критериев (переход от функций, отражающих свойства конструируемого движения, через уравнение Эйлера к функционалу-критерию). Ряд технических приложений такого подхода отражен в [10].

В [8] решены полные обратные задачи вариационного исчисления: по задаваемой функции предполагаемого поведения проектируемой системы восстановлен функционал-критерий, минимум которого подтвержден необходимым и достаточными условиями оптимальности. Синтезируемые управления могут использоваться в манипуляторах для морской среды при учёте сопротивления движению.

Цель исследований – анализ динамики звеньев антропоморфного манипулятора (с определением энергозатрат) при реализации

оптимального управления движением объекта в морской среде.

Основная часть.

С использованием алгоритма конструирования управления переносным движением объекта возможно не только достижение цели движения за заданное время и расстояние, но и экономия энергии на его реализацию. Схема поворота элемента руки изображена на **Рис.1**.

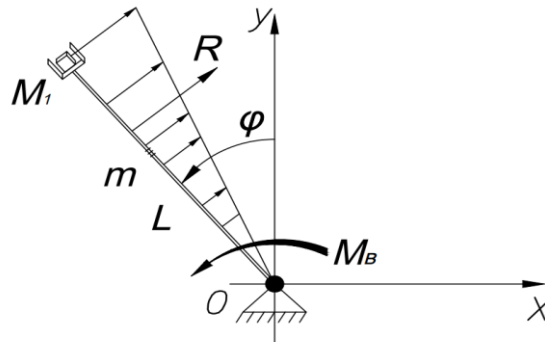


Рис.1 – Вращение жесткого консольного элемента в морской среде

В классическом управлении, когда в качестве критерия используется «норма мощности», графики углового ускорения, скорости и угла поворота изображены на **Рис.2**.

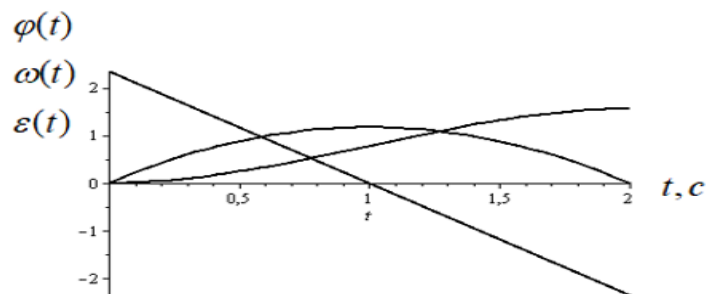


Рис.2 – Графики движения при классическом управлении

Например, для нового частного случая кососимметричного управления со степенью полинома $n = 3$ угловое ускорение, угловая скорость и угла поворота описываются зависимостями:

$$\varepsilon(t) = \frac{10\varphi_*}{T^5}(T - 2t)^3, \quad \omega(t) = \frac{10\varphi_* t}{T^5}(T - t)(2t^2 - 2Tt + T^2), \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_* t^2}{T^5}(5t^3 - 10T^2t + 10Tt^2 - 4t^3).$$

На **Рис.3** изображены графики $\varphi(t), \omega(t), \ddot{\varphi}(t)$ в случае конструируемого управления.

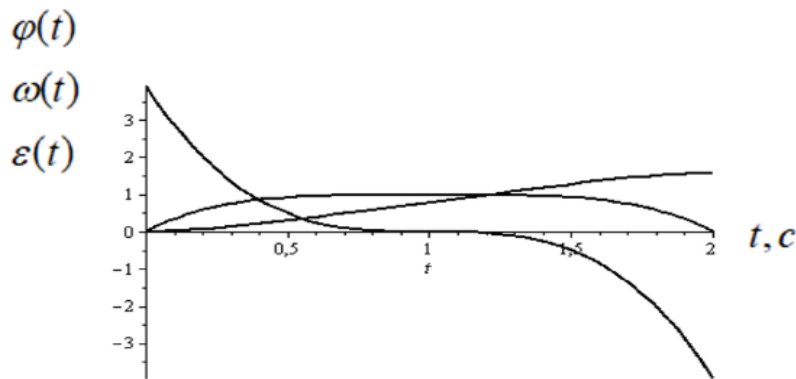


Рис.3 – Графики движения при конструируемом управлении

Равнодействующая линейно-вязкого сопротивления консоли при её вращении в водной среде вокруг неподвижной оси является диссипативной функцией Релея:

$$R = \frac{1}{2} L \cdot K_1 \cdot S \dot{\phi} L = \frac{K_1 S \dot{\phi} L^2}{2}, \quad (2)$$

где $K_1 = \text{const}$, S – площадь элемента длиной 1 м и толщиной δ ; $\dot{\phi}$ – угловая скорость; L – общая длина консоли. Момент равнодействующей сопротивления (по отношению к оси вращения):

$$M_R = R \cdot \frac{2}{3} L = \frac{K_1 S \dot{\phi} L^3}{3}. \quad (3)$$

С привлечением теоремы об изменении главного момента количества движения системы получено дифференциальное уравнение вращения консоли:

$$I \frac{d^2 \phi}{dt^2} = -M_R + M^{ep}. \quad (4)$$

Из (4) следует выражение для движущего момента:

$$M^{ep} = I \frac{d^2 \phi}{dt^2} + M_R, \quad (5)$$

где физический момент инерции $I = \frac{mL^2}{3} + M_1 L^2$.

Графики движущего момента M^{ep} для классического управления изображены на **Рис.4,5** – без учета и с учетом сопротивления движению соответственно.

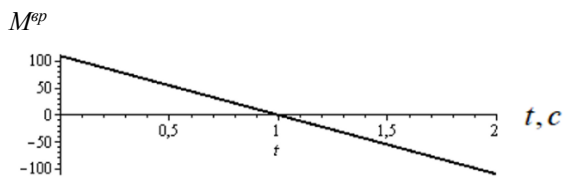


Рис.4 – График движущего момента без учета сопротивления

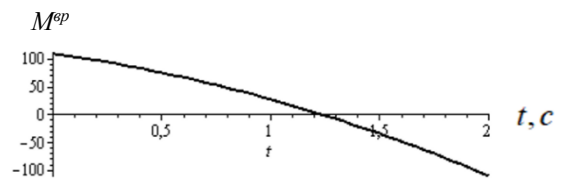


Рис.5 – График движущего момента с учетом сопротивления

Затрачиваемая на реализацию движения энергия вычислялась согласно зависимостям: без учета сопротивления движению

$$A = 2 \int_0^{T/2} M^{ep} \cdot \omega dt; \quad \text{в случае учета сопротивления}$$

$$\text{движению } A = \int_0^{T_1} M^{ep} \omega dt - \int_{T_1}^T M^{ep} \omega dt, \quad \text{где } T_1 - \text{ время переключения}$$

движущего момента (согласно графикам **Рис.4,5**). Использование конструируемого управления приводит к экономии энергии на реализацию движения.

Формы движения антропоморфного манипулятора (с двумя степенями свободы)

С использованием принципа действия (в форме Лагранжа) выявлена предпочтительная форма движения руки антропоморфного манипулятора с жесткими звеньями при оптимальном движении – за фиксированное время.

Реализация оптимальных управлений требует учета не только энергоемкости управления, но и поиска приемлемой формы движения многосвязных исполнительных механизмов для достижения конечного состояния центра масс схвата. Дана оценка форм движения на примере руки антропоморфного манипулятора с привлечением принципа действия.

Оптимальное управление вращением звеньев манипулятора для достижения конечного состояния покоя схвата

Для оптимального управления вращением жестких звеньев манипулятора, работающего в горизонтальной плоскости, принят критерий

$$\text{оптимальности } J = \int_0^T \varepsilon^2 dt, \quad \text{где } \varepsilon - \text{угловое ускорение (управление).}$$

При краевых условиях $\varphi(0) = 0$, $\dot{\varphi}(0) = \omega(0) = 0$, $\varphi(T) = \varphi_*$, $\dot{\varphi}(T) = \omega(T) = 0$ с использованием вариационного исчисления получены зависимости для углов поворотов, угловых скоростей и угловых ускорений

звеньев руки манипулятора:

$$\varepsilon(t) = \frac{6\varphi_*}{T^2} \left(1 - \frac{2t}{T}\right), \quad \omega(t) = \frac{\varphi_*}{T^2} \left(6t - \frac{6t^2}{T}\right); \quad \varphi(t) = \frac{\varphi_*}{T^2} \left(3t^2 - \frac{2t^3}{T}\right). \quad (6)$$

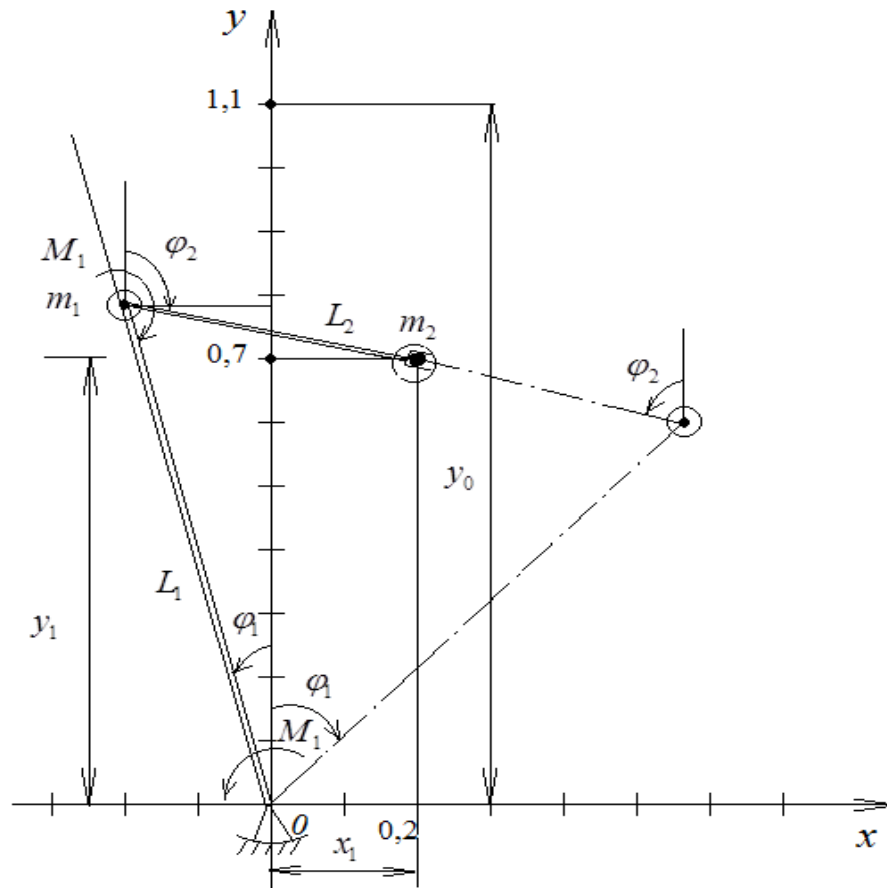


Рис.6 – Схема движения звеньев антропоморфного манипулятора: по второй (предпочтительной) форме – сплошные линии

Кинематика оптимального вращения каждого из звеньев манипулятора при любой форме движения (Рис.6) описывается зависимостями общего вида (6). Здесь φ_* — соответственно максимальный угол поворота для каждого из звеньев при достижении центром масс схвата конечной точки с координатами x_1, y_1 . С целью упрощения решения задачи исходное состояние манипулятора описывается координатой центра масс схвата $x_0 = 0, y_0 = L_1 + L_2$, где L_1, L_2 — длины звеньев.

Принцип действия как критерий оценки формы движения руки

Каждой из форм движения звеньев руки соответствует общее выражение для кинетической энергии:

$$T_k = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \omega_1^2(t) + \frac{1}{2} m_2 \left(L_1^2 \omega_1^2(t) + L_2^2 \omega_2^2(t) + 2L_1 \omega_1(t) L_2 \omega_2(t) \cos(\varphi_1(t) + \varphi_2(t)) \right),$$

где m_1, m_2 – сосредоточенные массы, звенья предполагаются невесомыми; $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$ – углы поворотов звеньев руки по отношению к исходному положению; $\omega_1(t), \omega_2(t)$ – угловые скорости звеньев. При численном анализе принято: $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 5$ кг. В процедуре оценки формы движения использован принцип действия: $J = \int_0^T 2T_k dt$. На практическое

использование принципа действия для оценки форм движения манипулятора обращено внимание, например, в работе [9].

Общая энергия, затраченная на реализацию управлений по каждой из форм движения, найдена согласно зависимости

$$A = \left| \int_0^T M_1(t) \dot{\varphi}_1(t) dt \right| + \left| \int_0^T M_2(t) \dot{\varphi}_2(t) dt \right|,$$

где $\dot{\varphi}_1(t), \dot{\varphi}_2(t)$ – угловые скорости звеньев; $M_1(t), M_2(t)$ – движущие моменты в приводах, которые (для каждой из форм движения) находятся с использованием уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_k}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T_k}{\partial \varphi_1} = M_1(t), \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T_k}{\partial \dot{\varphi}_2} - \frac{\partial T_k}{\partial \varphi_2} = M_2(t).$$

Определение конечных углов поворота звеньев при достижении центром масс схвата точки с координатами x_1, y_1

Для второй формы движения система трансцендентных уравнений для определения φ_1^*, φ_2^* , соответствующих этой форме:

$$\begin{aligned} L_1 \sin(\varphi_1^*) - L_2 \cos(\varphi_2^*) + x_1 &= 0, \\ -L_1 \cos(\varphi_1^*) + L_2 \sin(\varphi_2^*) + y_1 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Система уравнений (7) решена численно при следующих исходных данных: $L_1 = 0,8$ м; $L_2 = 0,4$ м; $x_1 = 0,2$ м; $y_1 = 0,7$ м. По второй форме – соответственно $\varphi_1^* = 0,2432$ (13,92°); $\varphi_2^* = 1,1923$ (101,02°).

Для проверки найденных углов при заданных длинах звеньев построены для каждой из форм конечные положения звеньев, которые подтверждают (Рис.6) правильность найденных корней системы трансцендентных уравнений (7).

Построен график изменения общей кинетической энергии при $T = 1$ с и графики движущих моментов (Рис.7). Экстремум кинетической энергии и графики движущих моментов иллюстрируют кососимметричный характер оптимального управления.

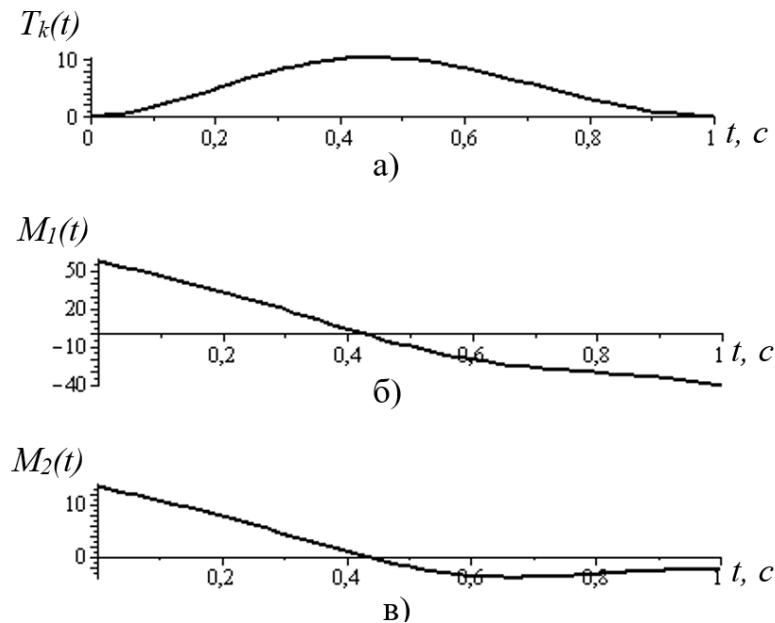


Рис.7 – Движение по первой форме: а) $T_k(t)$; б) $M_1(t)$; в) $M_2(t)$

Учет сопротивления при движении антропоморфного манипулятора в морской среде

В связи с вращением звена OA скорость точки A вычисляется как $V_A = \dot{\varphi}_1 \cdot L_1$. Звено AB совершает плоское движение, и поэтому скорость точки B в векторном виде согласно формуле Эйлера равна

$$\bar{V}_B = \bar{V}_A + \bar{V}_{BA},$$

где $\bar{V}_{BA}$ – скорость точки B в связи с ее вращением вместе со звеном AB вокруг точки A . $V_{BA} = \dot{\varphi}_2 \cdot L_2$, $\bar{V}_{BA} \perp AB$.

На Рис.8 изображена схема направлений скоростей. Общая проекция скорости точки B на направление, перпендикулярное AB , равна

$$V_B = \dot{\varphi}_2 \cdot L_2 + \dot{\varphi}_1 \cdot L_1 \sin\left(\varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right).$$

Силы линейно-вязкого сопротивления сосредоточенных масс направлены противоположно найденным скоростям $\bar{V}_A$ и $\bar{V}_B$.

С учетом сопротивления движению движущие моменты вычисляются следующим образом

$$M_1^o = M_1 + M_{1r}, \quad M_2^o = M_2 + M_{2r}, \quad \text{где } M_{1r} = kV_A L_1, \quad M_{2r} = kV_B L_2, \quad k = \text{const.}$$

На Рис.9 и Рис.10 изображены графики движущих моментов без учета и с учетом сопротивления.

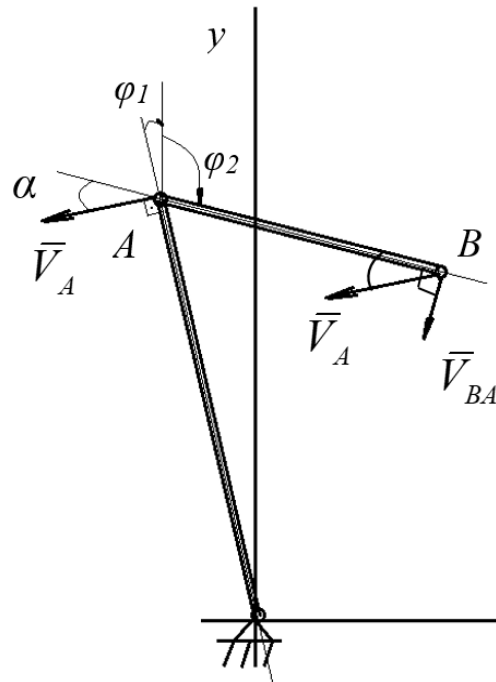


Рис.8 – План скоростей точек манипулятора

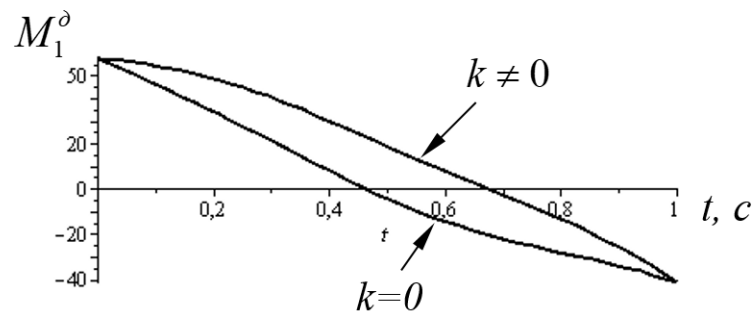


Рис.9 – Движущий момент первого звена без учета и с учетом сопротивления

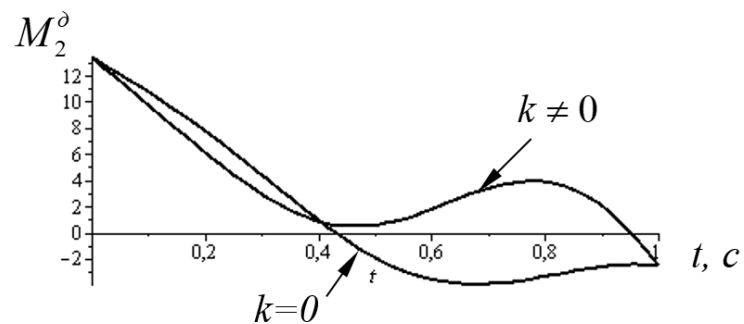


Рис.10 – Движущий момент второго звена без учета и с учетом сопротивления

Выводы. При реализации оптимального управления движением объекта в морской среде с использованием антропоморфного манипулятора затраты энергии возрастают на 50% и более по сравнению с аналогичным движением в воздушной среде. Подлежат экспериментальной проверке силы сопротивления движению звеньев манипулятора.

Библиографический список

1. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
2. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
3. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. школа, 1982. – 116 с.
4. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 236 с.
5. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
6. Олейников В.А. Основы оптимального управления / В.А. Олейников, Н.С. Зотов, А.М. Пришвин. – М.: Высш. школа, 1969. – 216 с.
7. Абдуллаев Н.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов / Н.Д. Абдуллаев, Ю.П. Петров. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
8. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
9. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – С.-Пб: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
10. Бохонский А.И. Эквивалентные по энергоемкости управления движением объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – Севастополь: СевГУ, 2021. – № 4(16). – С. 38 – 41.

Bibliograficheskiy spisok

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

-
- deformiruemyh sistem / I.A. Karnovskij, YU.M. Pochtman. – K.: Vyssh. shkola, 1982. – 116 s.
4. Troickij V.A. Optimal'nye processy kolebaniy mekhanicheskikh sistem / V.A. Troickij. – L.: Mashinostroenie, 1976. – 236 s.
 5. CHernous'ko F.L. Upravlenie kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, P.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 s.
 6. Olejnikov V.A. Osnovy optimal'nogo upravleniya / V.A. Olejnikov, N.S. Zotov, A.M. Prishvin. – M.: Vyssh. shkola, 1969. – 216 s.
 7. Abdullaev N.D. Teoriya i metody proektirovaniya optimal'nyh regulyatorov / N.D. Abdullaev, YU.P. Petrov. – L.: Energoatomizdat, 1985. – 240 s.
 8. Bokhonsky A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti / A.I. Bokhonsky. – M.: Vuzovskij uchebnyk: INFRA-M, 2016. – 174 s.
 9. Bokhonsky A.I. Konstruirovaniye optimal'nyh upravleniy peremeshcheniem uprugih ob"ektov / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya. – S.-Pb.: NIC MS, 2020. – 120 s.
 10. Bokhonsky A.I. Ekvivalentnye po energoemkosti upravleniya dvizheniem ob"ektov / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino-priborostroenii. – Sevastopol': SevGU, 2021. – № 4(16). – S. 38 – 41.

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

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

OPTIMAL MOVEMENT OF ANTHROPOMORPHOUS MANIPULATOR IN MARINE ENVIRONMENT

A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya

An algorithm for solving the complete inverse task of the variational calculus for a control of the "acceleration-deceleration" type for an object portable movement is used. The fundamental difference is the absence of a pre-set optimality criterion. With the use of angular acceleration (control), the optimal rotation of the cantilever element of an anthropomorphic manipulator is investigated, taking into account the linear-viscous resistance of the marine environment. Driving moments are found as solutions to the inverse task of

dynamics. Taking into account the movement resistance, it is possible to save energy to achieve the final state (compared to the known classical control).

Keywords: rotation dynamics console, optimal acceleration, linear-viscous resistance, anthropomorphic manipulator, kinematic characteristics, driving moments.

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

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

ПРИБЛИЖЕННОЕ НАХОЖДЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ С ПОЭЛЕМЕНТНЫМ РЕЗЕРВОМ ВРЕМЕНИ

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

Аннотация. Одним из методов повышения надежности и эффективности технических систем является временное резервирование. Оно предоставляет системе дополнительное время (резерв времени) на восстановление характеристик. В данной работе строится полумарковская модель с общим фазовым пространством состояний двухкомпонентной системы с поэлементным резервом времени. Рассматривается случай, когда резерв времени (мгновенно пополняемый) имеет только один из элементов системы. Получены расчетные формулы для приближенного вычисления стационарных характеристик надежности системы, используя построенную полумарковскую модель и алгоритм асимптотического фазового укрупнения. Проводится сравнение результатов вычислений, полученных с использованием приближенных и точных формул.

Ключевые слова. Полумарковская модель, резерв времени, алгоритм асимптотического фазового укрупнения, опорная система, характеристики надежности.

Введение. При проектировании и эксплуатации технических систем большое внимание уделяется надежности и эффективности как самой системы в целом, так и отдельных ее компонентов. Существуют различные способы повышения надежности и эффективности функционирования технических систем, одним из которых является временное резервирование.

О временном резервировании [1-3] говорят в тех случаях, когда системе в процессе ее функционирования предоставляется дополнительное время (резерв времени) на восстановление ее технических характеристик. В производственных системах источники резерва времени могут быть различными: склады, различного вида межоперационные накопители, запас производительности и т.д. [4-6,13]. Стоит отметить, что резерв времени имеют системы, обладающие функциональной инерционностью.

Для систем с резервом времени нарушение работоспособности (отказ объекта) еще не означает отказ самой системы, если восстановление работоспособности объекта заканчивается до израсходования резерва времени.

В ряде работ для построения моделей систем и исследования их характеристик используется теория полумарковских процессов с дискретным фазовым пространством состояний [10,14] и общим фазовым пространством состояний [3,7-9,13].

В данной работе с использованием теории полумарковских процессов с общим фазовым пространством состояний строится модель двухкомпонентной системы с поэлементным мгновенно пополняемым резервом времени. Определяются характеристики надежности рассматриваемой системы, проводится анализ влияния величины резерва времени на полученные характеристики.

Целью данной работы является построение полумарковской модели двухкомпонентной системы с поэлементным мгновенно пополняемым резервом времени и нахождение приближенных стационарных характеристик надежности. Рассматривается случай, когда резерв времени имеет только один элемент (для второго он считается равным 0).

Описание системы. Рассматривается система S , состоящая из двух компонентов K_1 и K_2 , причем компонент K_1 имеет мгновенно пополняемый резерв времени, равный $h = \text{const}$. Время безотказной работы компонентов K_1, K_2 – случайные величины (СВ) α_1, α_2 с функциями распределения (ФР) $F_1(t) = P(\alpha_1 \leq t), F_2(t) = P(\alpha_2 \leq t)$, времена восстановления компонентов – СВ β_1, β_2 с ФР $G_1(t) = P(\beta_1 \leq t), G_2(t) = P(\beta_2 \leq t)$. После восстановления первого компонента резерв времени пополняется до уровня h . СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания, у функций $F_1(t), F_2(t), G_1(t), G_2(t)$ существуют плотности $f_1(t), f_2(t), g_1(t), g_2(t)$. Рассматривается случай параллельного соединения компонентов без их отключения. Отказ системы S наступает, если оба компонента восстанавливаются и полностью израсходован резерв времени.

Для описания функционирования системы используем полумарковский процесс $\xi(t)$ [11-13]. Введем следующее множество E полумарковских состояний системы:

$$E = \{1, 210x, 1\bar{0}1x, 1\bar{0}0x, 211x, 111x, 2\bar{0}0xz, 101x_1x_2, 100x_1x_2, 2\bar{0}1xz, 200x, 110x, 201x\}.$$

Значение кодировки состояний следующее:

1 – оба компонента начинают работу, резерв времени полный;

210x – компонент K_2 начал восстановление, K_1 работает, $x > 0$ время до конца работы первого, резерв не используется;

$1\bar{0}1x$ – компонент K_1 начал восстановление и продолжает функционировать за счет резерва времени, $x > 0$ время до конца работы K_2 ;

$1\bar{0}0x$ – K_1 начал восстановление и продолжает функционировать за счет резерва времени, K_2 восстанавливается, $x > 0$ время до конца восстановления K_2 ;

$211x$ – K_2 приступил к работе, $x > 0$ время до конца работы K_1 , резерв не используется;

$111x$ – K_1 приступает к работе, резерв времени пополняется до уровня h и не используется, $x > 0$ время до конца работы K_2 ;

$110x$ – K_1 начал работу, резерв времени пополняется до уровня h и не используется, $x > 0$ время до начала работы K_2 ;

$201x$ – K_1 восстанавливается, резерв времени израсходован полностью, K_2 приступил к работе, $x > 0$ время до начала работы K_1 ;

$200x$ – K_1 восстанавливается, резерв времени израсходован полностью, K_2 начал восстанавливаться, $x > 0$ время до начала работы K_1 , отказ системы;

$2\bar{0}0xz$ – K_1 восстанавливается и функционирует за счет резерва времени, K_2 начал восстанавливаться, $x > 0$ время до начала работы K_1 , z – величина оставшегося резерва времени;

$101x_1x_2$ – K_1 восстанавливается, резерв времени исчерпан, x_1 – время до окончания восстановления K_1 , x_2 – время до конца работы K_2 ;

$2\bar{0}1xz$ – K_1 восстанавливается и функционирует за счет резерва времени, K_2 приступает к работе, $x > 0$ время до начала работы K_1 , z – величина оставшегося резерва времени;

$100x_1x_2$ – оба компонента восстанавливаются, резерв времени полностью исчерпан, x_1 – время до окончания восстановления K_1 , x_2 – время до конца восстановления K_2 , отказ системы.

Временная диаграмма функционирования рассматриваемой системы изображена на **Рис.1**.

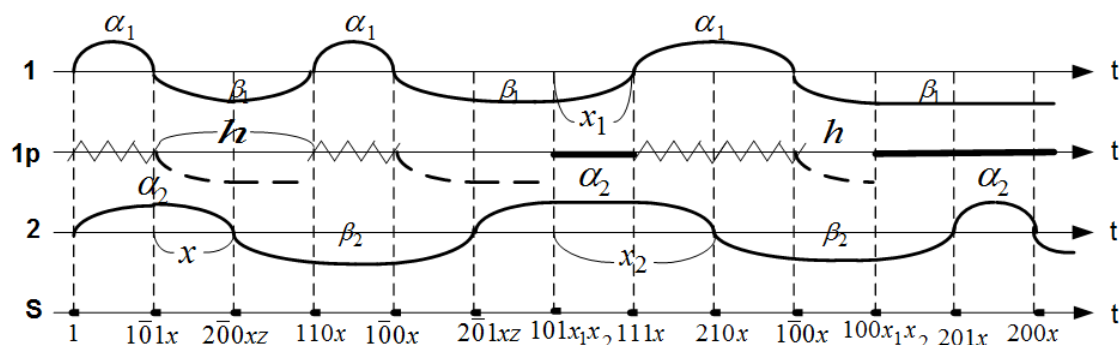


Рис.1 – Временная диаграмма функционирования исходной системы

Перейдем к нахождению приближенных значений стационарных характеристик надежности системы, для этого используем алгоритм асимптотического фазового укрупнения [11,12,15].

Предположим, что стохастическое ядро вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n; n \geq 0\}$ полумарковского процесса $\xi(t)$ исходной системы близко к стохастическому ядру ВЦМ $\{\xi_n^{(0)}; n \geq 0\}$ опорной системы S_0 с единственным стационарным распределением $\rho(dx)$. Тогда для приближенного нахождения средней стационарной наработки на отказ T_+ , среднего стационарного времени восстановления T_- и стационарного коэффициента готовности K_r исходной системы S можно использовать следующие приближенные формулы [16]:

$$T_+ \approx \frac{(\rho, \bar{m}_1)}{(\rho, P^{(r)} \bar{1}_0)}, \quad T_- \approx \frac{(\rho, P^{(r)} \bar{m}_0)}{(\rho, P^{(r)} \bar{1}_0)}, \quad K_r = \frac{T_+}{T_+ + T_-}, \quad (1)$$

где

$$\bar{m}_1(x) = \begin{cases} m(x), & x \in E_+, \\ 0, & x \in E_-, \end{cases} \quad \bar{m}_0(x) = \begin{cases} 0, & x \in E_+, \\ m(x), & x \in E_-, \end{cases}$$

$$\bar{1}_0(x) = \begin{cases} 0, & x \in E_+, \\ 1, & x \in E_-, \end{cases} \quad (\rho, f) = \int_X f(x) \rho(dx),$$

$\rho(dx)$ – стационарное распределение опорной ВЦМ $\{\xi_n^{(0)}; n \geq 0\}$; $m(x)$ – средние времена пребывания в состоянии $x \in E$ исходной системы; $P^{(r)}(x, B)$ – вероятности переходов ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ исходной системы, r – минимальное число шагов, за которое система может перейти в подмножество отказовых состояний E_- из работоспособных E_+ , входящих в эргодический класс E^0 .

Выберем опорную систему S_0 . Предположим, что у исходной системы время безотказной работы элементов системы значительно больше времени восстановления. Тогда, опорной будет система S_0 , у которой компоненты восстанавливаются мгновенно, то есть суперпозиция двух процессов восстановления.

Временная диаграмма функционирования опорной системы приведена на Рис.2.

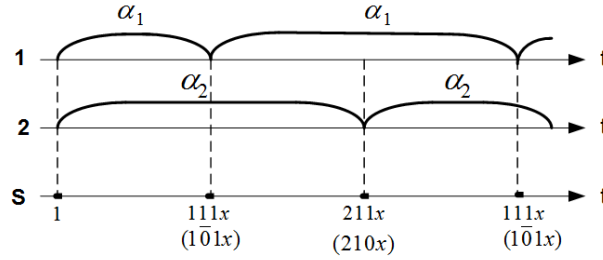


Рис.2 – Временная диаграмма функционирования опорной системы S_0

Вероятности переходов ВЦМ $\{\xi_n^0; n \geq 0\}$ опорной системы имеют вид:

$$\begin{aligned} p_{111x}^{101y} &= f_1(x-y), \quad 0 < y < x, \quad p_{111x}^{210y} = f_1(x+y), \quad y > 0, \quad p_{101x}^{111x} = 1, \\ p_{211x}^{101y} &= f_2(x+y), \quad y > 0, \quad p_{211x}^{210y} = f_2(x-y), \quad 0 < y < x, \quad p_{210x}^{211x} = 1. \end{aligned}$$

Обозначим через $\rho(111x)$, $\rho(101x)$, $\rho(211x)$, $\rho(210x)$ значения стационарного распределения ВЦМ $\{\xi_n^0; n \geq 0\}$ на состояниях 111x, 101x, 211x, 210x. Составим для них систему интегральных уравнений [12]:

$$\begin{cases} \rho(111x) = \rho(101x), & \rho(211x) = \rho(210x), \\ \rho(101x) = \int_x^\infty \rho(111y) f_1(y-x) dy + \int_0^\infty \rho(211y) f_2(y+x) dy, \\ \rho(211x) = \int_x^\infty \rho(211y) f_2(y-x) dy + \int_0^\infty \rho(111y) f_1(y+x) dy, \\ \int_0^\infty \rho(111x) dx + \int_0^\infty \rho(101x) dx + \int_0^\infty \rho(211x) dx + \int_0^\infty \rho(210x) dx = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Последнее уравнение системы – условие нормировки. Как показано в [12], система уравнений (2) имеет следующее решение:

$$\rho(111x) = \rho(101x) = \rho_0 \bar{F}_2(x), \quad \rho(211x) = \rho(210x) = \rho_0 \bar{F}_1(x), \quad (3)$$

где ρ_0 находится из условия нормировки.

Класс эргодических состояний опорной системы:

$$E^0 = \{111x, 101x, 211x, 210x\}.$$

Для исходной системы множество работоспособных E_+ и отказовых E_- состояний имеют вид:

$$E_+ = \{1, 210x, 1\bar{0}1x, 1\bar{0}0x, 211x, 111x, 2\bar{0}0xz, 101x_1x_2, 2\bar{0}1xz, 110x, 201x\},$$

$$E_- = \{100x_1x_2, 200x\}.$$

Вероятности переходов ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ исходной системы, которые используются в применяемом методе, равны:

$$\begin{aligned} P_{210x}^{1\bar{0}0y} &= g_2(x+y), y > 0; P_{111x}^{210y} = f_1(x+y), y > 0; \\ P_{1\bar{0}1x}^{2\bar{0}0yh-x} &= g_1(x+y), y > 0, 0 < x < h; P_{110x}^{1\bar{0}0y} = f_1(x-y), 0 < y < x; \\ P_{1\bar{0}1x}^{101yx-h} &= g_1(y+h), y > 0, x > h; P_{100x}^{110y} = g_1(x-y), 0 < y < x, x > h; \\ P_{1\bar{0}1x}^{110y} &= g_1(x-y), 0 < y < x, 0 < x < h; P_{100x}^{100yx-h} = g_1(y+h), y > 0, x > h; \\ P_{111x}^{1\bar{0}1y} &= f_1(x-y), 0 < y < x; P_{211x}^{210y} = f_2(x-y), 0 < y < x; \\ P_{201x}^{200y} &= f_2(x-y), 0 < y < x. \end{aligned} \quad (4)$$

Средние значения времен пребывания в состояниях исходной системы определяются формулами:

$$\begin{aligned} M\theta_{210x} &= \int_0^x \bar{G}_2(t)dt, M\theta_{1\bar{0}1x} = \int_0^{x \wedge h} \bar{G}_1(t)dt, M\theta_{1\bar{0}0x} = \int_0^{x \wedge h} \bar{G}_1(t)dt, \\ M\theta_{211x} &= \int_0^x \bar{F}_2(t)dt, M\theta_{2\bar{0}0xz} = \int_0^{x \wedge z} \bar{G}_2(t)dt, M\theta_{2\bar{0}1xz} = \int_0^{x \wedge z} \bar{F}_2(t)dt, \\ M\theta_{101x_1x_2} &= M\theta_{100x_1x_2} = x_1 \wedge x_2, M\theta_{200x} = \int_0^x \bar{G}_2(t)dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Для рассматриваемой системы $r = 2$, так как исходная система может за 2 шага перейти в подмножество отказовых состояний E_- из работоспособных, входящих в эргодический класс E^0 .

Найдем стационарные характеристики системы T_+ , T_- , K_r , используя формулы (1), (3-5).

Вычислим

$$\begin{aligned} (\rho, \bar{m}_1) &= \int_{E_+} m(x) \rho(dx) = \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(x) dx \int_0^x \bar{F}_1(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(x) dx \int_0^{x \wedge h} \bar{G}_1(t) dt + \\ &+ \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^x \bar{F}_2(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^x \bar{G}_2(t) dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Сложив первое и третье слагаемые (6), получим:

$$\begin{aligned}
 & \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(x) dx \int_0^x \bar{F}_1(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^x \bar{F}_2(t) dt = \\
 & = \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(x) dx \int_0^x \bar{F}_1(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(x) dx \int_x^\infty \bar{F}_1(t) dt = \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty \bar{F}_1(t) dt = \\
 & = \rho_0 M \alpha_1 M \alpha_2.
 \end{aligned}$$

Второе слагаемое формулы (6) представляется в виде:

$$\rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_2(x) dx \int_0^{x \wedge h} \bar{G}_1(t) dt = \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^x \bar{G}_1(t) dt + \rho_0 \int_h^\infty \bar{F}_2(x) dx \int_0^h \bar{G}_1(t) dt.$$

если $x < h$ если $x > h$

Следовательно,

$$\begin{aligned}
 (\rho, \bar{m}_1) = \int_{E_+} m(x) \rho(dx) = & \rho_0 M \alpha_1 M \alpha_2 + \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^x \bar{G}_1(t) dt + \\
 & + \rho_0 \int_0^h \bar{G}_1(t) dt \int_h^\infty \bar{F}_2(x) dx + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^x \bar{G}_2(t) dt.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Найдем $(\rho, P^{(2)} \bar{1}_0) = \int_{E^0} \rho(dx) \int_{E^1} P(x, dy_1) P(y_1, E_-)$, где E^1 – множество предотказовых состояний. В отказ можно попасть:

1. по цепочке $210x \rightarrow 1\bar{0}0y_1 \rightarrow E_-$, то есть:
 $y_1 \geq h$

$$\rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^\infty g_2(x + y_1) \bar{G}_1(h) dy_1 = \rho_0 \bar{G}_1(h) \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{G}_2(x + h) dx, \quad (8)$$

2. по цепочке $1\bar{0}1x \rightarrow 20\bar{0}y(h - x) \rightarrow E_-$:
 $x < h \quad y > h - x$

$$\begin{aligned}
 & \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_{h-x}^\infty g_1(x + y) \bar{G}_2(h - x) dy = \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) \bar{G}_2(h - x) dx \int_{h-x}^\infty g_1(x + y) dy = \\
 & = \rho_0 \bar{G}_1(h) \int_0^h \bar{F}_2(x) \bar{G}_2(h - x) dx.
 \end{aligned} \quad (9)$$

Сложив (8) и (9), получим:

$$(\rho, P^{(2)} \bar{1}_0) = \rho_0 \bar{G}_1(h) \left[\int_0^h \bar{F}_2(x) \bar{G}_2(h - x) dx + \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{G}_2(x + h) dx \right]. \quad (10)$$

Найдем $(\rho, P^{(2)} \bar{m}_0) = \int_{E^0} \rho(dx) \int_E P(x, dy_1) \int_{E_-} P(y_1, dy_2) \bar{m}_0(y_2)$.

$$\begin{aligned}
(\rho, P^{(2)}\bar{m}_0) &= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_h^\infty g_2(x+y_1) dy_1 \int_0^\infty g_1(h+y_2) [(y_1-h) \wedge y_2] dy_2 + \\
&+ \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_{h-x}^\infty g_1(x+y_1) dy_1 \int_0^\infty g_2(h-x+y_2) [(y_1+x-h) \wedge y_2] dy_2.
\end{aligned} \tag{11}$$

Для первого слагаемого (11) сделаем замену переменной $\begin{bmatrix} y_1 - h = y'_1 \\ y_1 = y_1 + h \end{bmatrix}$, а для второго – $\begin{bmatrix} y_1 + x - h = y'_1 \\ y_1 = y_1 + h - x \end{bmatrix}$, получим

$$\begin{aligned}
(\rho, P^{(2)}\bar{m}_0) &= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_h^\infty g_2(x+y'_1+h) dy'_1 \int_0^\infty g_1(h+y_2) [y'_1 \wedge y_2] dy_2 + \\
&+ \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty g_1(y'_1+h) dy'_1 \int_0^\infty g_2(h-x+y_2) [y'_1 \wedge y_2] dy_2 = \\
&= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_h^\infty g_2(x+y_1+h) dy_1 \left[\int_0^{y_1} g_1(h+y_2) y_2 dy_2 + \int_{y_1}^\infty g_1(h+y_2) y_1 dy_2 \right] + \\
&\quad \left[\begin{array}{cc} \text{при } y_2 < y_1 & \text{при } y_2 > y_1 \end{array} \right] + \\
&+ \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty g_1(y_1+h) dy_1 \left[\int_0^{y_1} g_2(h-x+y_2) y_2 dy_2 + \int_{y_1}^\infty g_2(h-x+y_2) y_1 dy_2 \right] = \\
&\quad \left[\begin{array}{cc} \text{при } y_2 < y_1 & \text{при } y_2 > y_1 \end{array} \right] = \\
&= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_h^\infty g_2(x+y_1+h) dy_1 \int_0^{y_1} g_1(h+y_2) y_2 dy_2 + \\
&\quad + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_h^\infty g_2(x+y_1+h) dy_1 \int_{y_1}^\infty g_1(h+y_2) y_1 dy_2 + \\
&\quad + \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty g_1(y_1+h) dy_1 \int_0^{y_1} g_2(h-x+y_2) y_2 dy_2 + \\
&\quad + \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty g_1(y_1+h) dy_1 \int_{y_1}^\infty g_2(h-x+y_2) y_1 dy_2 =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^\infty g_1(y_2 + h) y_2 dy_2 \int_{y_2}^\infty g_2(x + y_1 + h) dy_1 + \\
 &+ \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_h^\infty g_2(x + y_1 + h) y_1 dy_1 \int_{y_1}^\infty g_1(y_2 + h) dy_2 + \\
 &+ \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty g_2(h - x + y_2) y_2 dy_2 \int_{y_2}^\infty g_1(y_1 + h) dy_1 + \\
 &+ \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty g_1(y_1 + h) y_1 dy_1 \int_{y_1}^\infty g_2(h - x + y_2) dy_2 = \\
 &= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^\infty y_2 g_1(y_2 + h) \bar{G}_2(x + y_2 + h) dy_2 + \\
 &+ \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_h^\infty y_1 g_2(x + y_1 + h) \bar{G}_1(y_1 + h) dy_1 + \\
 &+ \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty y_2 g_2(h - x + y_2) \bar{G}_1(y_2 + h) dy_2 + \\
 &+ \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty y_1 g_1(y_1 + h) \bar{G}_2(h - x + y_1) dy_1 = \\
 &= -\rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^\infty y d_y [\bar{G}_1(y + h) \bar{G}_2(x + y + h)] - \\
 &- \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty y d_y [\bar{G}_1(y + h) \bar{G}_2(h - x + y)] = \\
 &\left[\begin{aligned} u &= y, & du &= dy \\ dv &= d_y [\bar{G}_1(y + h) \bar{G}_2(x + y + h)], & v &= \bar{G}_1(y + h) \bar{G}_2(x + y + h) \end{aligned} \right] \\
 &= -\rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \left[y \bar{G}_1(y + h) \bar{G}_2(x + y + h) \Big|_0^\infty - \int_0^\infty \bar{G}_1(y + h) \bar{G}_2(x + y + h) dy \right] - \\
 &- \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \left[y \bar{G}_1(y + h) \bar{G}_2(h - x + y) \Big|_0^\infty - \int_0^\infty \bar{G}_1(y + h) \bar{G}_2(h - x + y) dy \right] =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^\infty \bar{G}_1(y+h) \bar{G}_2(x+y+h) dy + \\
&\quad + \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^\infty \bar{G}_1(y+h) \bar{G}_2(h-x+y) dy = \\
&= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_h^\infty \bar{G}_1(y) \bar{G}_2(x+y) dy + \rho_0 \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_h^\infty \bar{G}_1(y) \bar{G}_2(y-x) dy = \\
&= \rho_0 \int_h^\infty \bar{G}_1(y) dy \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{G}_2(x+y) dx + \rho_0 \int_h^\infty \bar{G}_1(y) dy \int_0^h \bar{F}_2(x) \bar{G}_2(y-x) dx.
\end{aligned}$$

В результате, искомое выражение примет вид:

$$\begin{aligned}
(\rho, P^{(2)} \bar{m}_0) &= \int_{E^0} \rho(dx) \int_E P(x, dy_1) \int_{E_-} P(y_1, dy_2) \bar{m}_0(y_2) = \\
&= \rho_0 \int_h^\infty \bar{G}_1(y) dy \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{G}_2(x+y) dx + \rho_0 \int_h^\infty \bar{G}_1(y) dy \int_0^h \bar{F}_2(x) \bar{G}_2(y-x) dx.
\end{aligned} \tag{12}$$

Следовательно, средняя стационарная наработка системы на отказ T_+ , среднее стационарное время восстановления системы T_- приближённо равны:

$$\begin{aligned}
T_+ &\approx \frac{(\rho, \bar{m}_1)}{(\rho, P^{(2)} \bar{l}_0)} = \\
&= \frac{M\alpha_1 M\alpha_2 + \int_0^h \bar{F}_2(x) dx \int_0^x \bar{G}_1(t) dt + \int_0^h \bar{G}_1(t) dt \int_h^\infty \bar{F}_2(x) dx + \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^x \bar{G}_2(t) dt}{\bar{G}_1(h) \left(\int_0^h \bar{F}_2(x) \bar{G}_2(h-x) dx + \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{G}_2(x+h) dx \right)}. \tag{13}
\end{aligned}$$

$$T_- \approx \frac{(\rho, P^{(r)} \bar{m}_0)}{(\rho, P^{(r)} \bar{l}_0)} = \frac{\int_h^\infty \bar{G}_1(y) dy \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{G}_2(x+y) dx + \int_h^\infty \bar{G}_1(y) dy \int_0^h \bar{F}_2(x) \bar{G}_2(y-x) dx}{\bar{G}_1(h) \left(\int_0^h \bar{F}_2(x) \bar{G}_2(h-x) dx + \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{G}_2(x+h) dx \right)}. \tag{14}$$

В качестве иллюстративного примера использования формул (1), (13), (14), рассмотрим систему, у которой средние время безотказной работы компонентов K_1 и K_2 имеют значения $M\alpha_1 = 8,33$ ч., $M\alpha_2 = 6,25$ ч.; средние времена восстановления компонентов K_1 и K_2 равны $M\beta_1 = 0,71$ ч., $M\beta_2 = 0,83$ ч., СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ имеют распределение Эрланга 5-го порядка. Резерв времени h изменяется от 0 до 0,7 часа с шагом 0,1 ч.

Определены соответствующие значения средней стационарной наработки на отказ T_+ , среднего стационарного времени восстановления T_- и стационарного коэффициента готовности K_G рассматриваемой системы. Результаты представлены в таблице 1 и на **Рис.3**.

Таблица 1 – Значения стационарных характеристик системы при различном резерве времени

h , ч.	T_+ , ч.	T_- , ч.	K_G
0	70,347	0,393	0,99444
0,1	71,143	0,359	0,99498
0,2	72,851	0,322	0,99561
0,3	77,308	0,287	0,9963
0,4	86,281	0,259	0,99701
0,5	101,574	0,236	0,99768
0,6	125,693	0,219	0,99826
0,7	162,566	0,206	0,99873

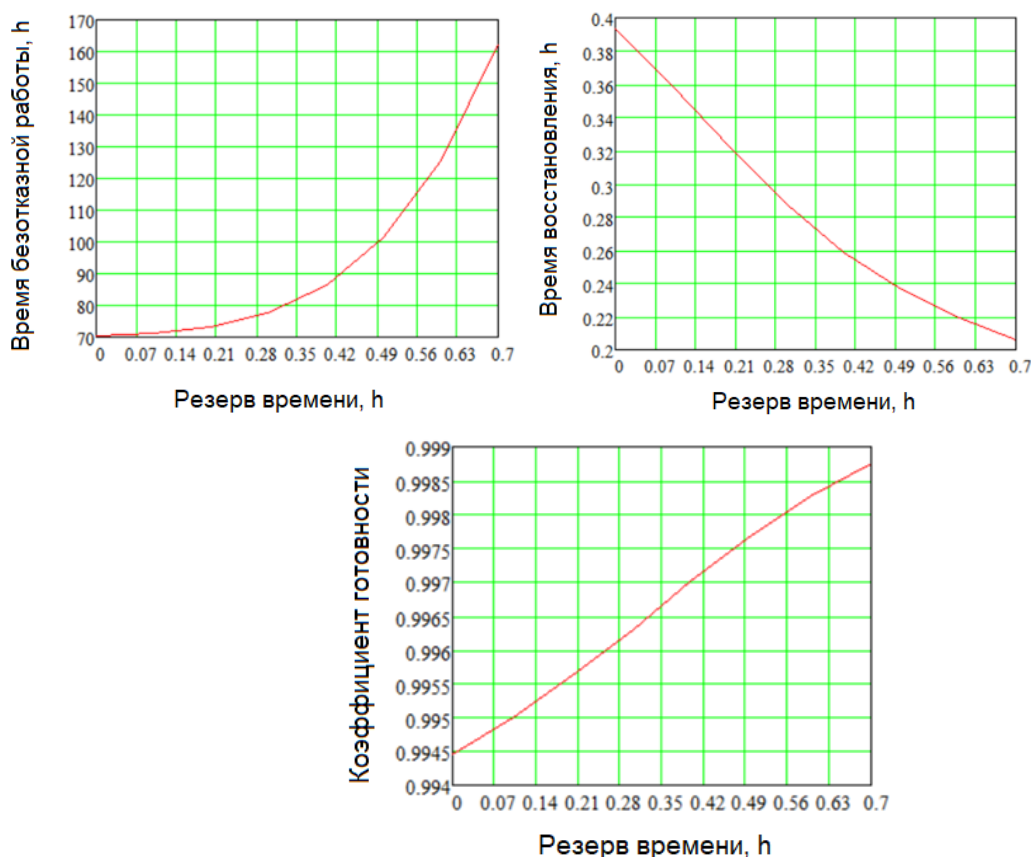


Рис.3 – Зависимость стационарных характеристик надежности системы от величины резерва времени

Данная система соответствует системе, рассмотренной [17], когда резерв времени у второго компонента отсутствует. В таблице 2 приведено сравнение результатов расчетов коэффициента готовности для системы из [17] (резерв времени второго элемента отсутствует, т.е. $h_2=0$) и таблицы 1. Резерв времени h изменяется от 0 до 0,7 часа с шагом 0,1 ч. Точное значение найдено в [17] (при $h_2=0$), а приближенное – по (1), используя (13) и (14).

Таблица 2 – Сравнение коэффициентов готовности

h , ч.	Точные формулы	Приближенные формулы	Погрешность
0	0,99230	0,99444	0,00214
0,1	0,99324	0,99498	0,00174
0,2	0,99421	0,99561	0,0014
0,3	0,99520	0,99630	0,0011
0,4	0,99615	0,99701	0,00086
0,5	0,99702	0,99768	0,00066
0,6	0,99777	0,99826	0,00049
0,7	0,99839	0,99873	0,00034

Таким образом, погрешность расчетов при использовании приближенных формул (1) составляет менее 1%.

Временное резервирование широко используется для обеспечения надежности и эффективности функционирования технических систем. В отличие от других видов резервирования здесь резервом является запас времени, который возникает в процессе функционирования системы. Резерв времени можно использовать для переключения структурного резерва, обнаружения и устранения отказов, повторения работ, обесцененных отказами, ожидания загрузки в работоспособном состоянии. Временное резервирование широко применяется в технических и информационных системах, вычислительных сетях, системах связи.

В данной работе построена полумарковская модель двухкомпонентной технической системы с покомпонентным резервом времени в случае, когда резерв имеет только один компонент. Используя алгоритм фазового укрупнения, приближенно найдены стационарные характеристики надежности рассматриваемой системы. Проведен анализ влияния величины мгновенно пополняемого резерва времени на полученные характеристики надежности.

Результаты данной работы могут быть использованы для построения моделей технических систем с различными видами и стратегиями использования резерва времени, инженерных расчетов и решения оптимизационных задач.

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

Библиографический список

1. Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью / Г.Н. Черкесов. – Москва: Сов. Радио, 1974. – 296 с.
2. Креденцер Б.П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью / Б.П. Креденцер. – Киев: Наук. Думка, 1978. – 240 с.
3. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. – 284 с.
4. Новиков Е.В. Оценка влияния временного резервирования на надежность сложных технических систем / Е.В. Новиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 3(2). – С. 28–33.
5. Песчанский А.И. Полумарковская модель восстанавливаемой системы с поэлементным временным резервированием / А.И. Песчанский // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 12. – С. 146–159.
6. Ushakov I.A. Probabilistic Reliability Models. – Wiley, 2012. – 244 p.
7. Руденко Ю.Н. Надежность систем энергетики / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков. – 2-е изд. перераб. и доп. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 328 с.
8. Obzherin Yu.E. Analysis of the time reserve influence on the technological cell productivity / Yu.E. Obzherin, S.M. Sidorov, S.N. Fedorenko // MATEC Web of Conferences, Vol. 129. – 2017. – Art. No. 03009.
9. Obzherin Yu.E. Reliability analysis of a system with combined time reserve / Yu.E. Obzherin, A.I. Peschansky // Cybern. Syst. Anal. – 2004. – Vol. 40(5). – P. 747–754.
10. Limnios N. Semi-Markov Processes and Reliability // N. Limnios, G. Oprisan. – New York, Springer Science+Business Media, 2001. – 222 p.
11. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин – К.: Наук. Думка, 1982. – 236 с.
12. Korolyuk V.S. Stochastic Models of Systems // V.S. Korolyuk, V.V. Korolyuk. – Dordrecht, Springer Science+Business Media, 1999. – 185 p.
13. Obzherin Y.E. Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures // Y.E. Obzherin, E.G. Boyko. – London, Elsevier

Academic Press, 2015. – 212 p.

14. Barbu V.S. Semi-Markov Modelling for Multi-State Systems / V.S. Barbu, A. Karagrigoriou, A. Makrides // Methodology and Computing in Applied Probability. – 2017. – Vol. 19. – P. 1011–1028.
15. Korolyuk, V.S. Stochastic Systems in Merging Phase Space // V.S. Korolyuk, N. Limnios. – London, World Scientific, Imperial College Press, 2005. – 348 p.
16. Корлат А.Н. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.М. Новиков, А.Ф. Турбин. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 276 с.
17. Obzherin, Yu.E. Analysis of reliability of systems with component-wise storages / Yu.E. Obzherin, S.M. Sidorov, M.M. Nikitin // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 58. – Art. No. 02024.

Bibliograficheskij spisok

1. CHERkesov G.N. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem s vremennoj izbytochnost'yu / G.N. CHERkesov. – Moskva: Sov. Radio, 1974. – 296 s.
2. Kredencer B.P. Prognozirovanie nadezhnosti sistem s vremennoj izbytochnost'yu / B.P. Kredencer. – Kiev: Nauk. Dumka, 1978. – 240 s.
3. Kopp V.YA. Stokhasticheskie modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem s vremennym rezervirovaniem / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. – Sevastopol': Izd-vo SevGTU, 2000. – 284 s.
4. Novikov E.V. Ocenka vliyaniya vremennogo rezervirovaniya na nadezhnost' slozhnykh tekhnicheskikh sistem / E.V. Novikov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2010. – № 3(2). – S. 28–33.
5. Peschanskij A.I. Polumarkovskaya model' vosstanavlivaemoj sistemy s poelementnym vremennym rezervirovaniem / A.I. Peschanskij // Avtomatika i telemekhanika. – 2019. – № 12. – S. 146–159.
6. Ushakov I.A. Probabilistic Reliability Models. – Wiley, 2012. – 244 p.
7. Rudenko YU.N. Nadezhnost' sistem energetiki / YU.N. Rudenko, I.A. Ushakov. – 2-e izd. pererab. i dop. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1989. – 328 s.
8. Obzherin Yu.E. Analysis of the time reserve influence on the technological cell productivity / Yu.E. Obzherin, S.M. Sidorov, S.N. Fedorenko // MATEC Web of Conferences, Vol. 129. – 2017. – Art. No. 03009.

9. Obzherin Yu.E. Reliability analysis of a system with combined time reserve / Yu.E. Obzherin, A.I. Peschansky // *Cybern. Syst. Anal.* – 2004. – Vol. 40(5). – P. 747–754.
10. Limnios N. *Semi-Markov Processes and Reliability* // N. Limnios, G. Oprisan. – New York, Springer Science+Business Media, 2001. – 222 p.
11. Korolyuk V.S. *Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem* / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin – K.: Nauk. Dumka, 1982. – 236 s.
12. Korolyuk V.S. *Stochastic Models of Systems* // V.S. Korolyuk, V.V. Korolyuk. – Dordrecht, Springer Science+Business Media, 1999. – 185 p.
13. Obzherin Y.E. *Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures* // Y.E. Obzherin, E.G. Boyko. – London, Elsevier Academic Press, 2015. – 212 r.
14. Barbu V.S. *Semi-Markov Modelling for Multi-State Systems* / V.S. Barbu, A. Karagrigoriou, A. Makrides // *Methodology and Computing in Applied Probability*. – 2017. – Vol. 19. – P. 1011–1028.
15. Korolyuk, V.S. *Stochastic Systems in Merging Phase Space* // V.S. Korolyuk, N. Limnios. – London, World Scientific, Imperial College Press, 2005. – 348 p.
16. Korlat A.N. *Polumarkovskie modeli vosstanavlivaemyh sistem i sistem massovogo obsluzhivaniya* / A.N. Korlat, V.N. Kuznecov, M.M. Novikov, A.F. Turbin. – Kishinev: SHTinca, 1991. – 276 s.
17. Obzherin, Yu.E. Analysis of reliability of systems with component-wise storages / Yu.E. Obzherin, S.M. Sidorov, M.M. Nikitin // *E3S Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 58. – Art. No. 02024.

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

²Сидоров Станислав Михайлович, к.т.н., доцент, хаевес@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

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

APPROXIMATE DETERMINATION OF THE RELIABILITY
CHARACTERISTICS OF A SYSTEM WITH A TIME RESERVE USING ITS
SEMI-MARKOV MODEL

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

One of the methods for improving the reliability and efficiency of technical systems is temporary redundancy. It provides the system with additional time (time reserve) to restore performance. In this paper, we construct a semi-Markov model with a common phase space of states of a two-component system with an element-wise time reserve. We considering a case, when the time reserve (instantly replenished) has only one of the system elements. Using the developed semi-Markov model and the algorithm of asymptotic phase mergement, we obtain calculation formulas for the approximate calculation of the system reliability stationary characteristics. The results of calculations obtained using approximate and analytical formulas are compared.

Key words: Semi-Markov model, time reserve, asymptotic phase enlargement algorithm, reference system, reliability characteristics.

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

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

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

МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТОПЛИВНОЙ КОРРЕКЦИИ И УРОВНЕМ ТОКСИЧНОСТИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Скатков И.А.¹, Осипов К.Н.²

Аннотация. *Предлагается подход к эмпирическому моделированию причинно-следственных динамических зависимостей между значениями коэффициента топливной коррекции и концентрацией кислорода в отработавших газах поршневых двигателей внутреннего сгорания с последующим использованием полученных моделей для решения оптимизационной задачи с точки зрения принятых критериев. Преимущество использования предлагаемого подхода в сравнении с существующими методами, основанными на использовании топливных таблиц, связано с уменьшением коэффициента перерегулирования при работе двигателя на переходных и нестационарных режимах нагружения, уменьшением концентрации токсичных компонентов, содержащихся в отработавших газах без увеличения производственных затрат и снижения мощностных характеристик.*

Ключевые слова. *Оптимизация, моделирование, поршневые двигатели, коэффициент топливной коррекции.*

Постановка задачи в общем виде.

Задача улучшения характеристик современных инжекторных поршневых двигателей внутреннего сгорания, в том числе для снижения их токсичности и увеличения удельной мощности при одновременном сокращении производственных и эксплуатационных затрат, по-прежнему остается актуальной производственной и научно-технической задачей, особенно в условиях острой необходимости развития отечественных импортозамещающих технологий [1, 2]. Очевидно, что основой решения указанных задач должны быть математические модели, описывающие процессы смесеобразования, топливной коррекции, а также процессы протекающие в камере сгорания по минимально возможному объему информации. Определение вида и структуры таких моделей позволит усовершенствовать системы управления работой двигателей, снизить их токсичность, повысить экономичность и, как следствие, повысить конкурентоспособность.

Анализ современной технической и научной литературы последних лет, например, [1, 4– 8], показал, что несмотря на важность и актуальность примеров ее решения, особенно в количественном виде, к сожалению, недостаточно. Большинство из предлагаемых подходов либо носят

исключительно качественный теоретизированный характер, что ограничивает их практическое применение, либо предъявляют завышенные требования к аппаратному обеспечению. Кроме этого можно отметить, что отсутствие надежных методов управления токсичностью современных автомобильных дизелей, из-за отсутствия состоятельных математических моделей, привело к запрету эксплуатации таких двигателей в ряде городов Европейского союза.

Целью работы является эмпирическое моделирование динамической функциональной зависимости между значениями коэффициента топливной коррекции и концентрацией кислорода в отработавших газах поршневых двигателей внутреннего сгорания как основы для совершенствования системы управления составом топливно-воздушной смеси и снижения концентрации токсических компонентов в отработавших газах.

Основной материал статьи.

В современных поршневых двигателях управление процессом горения топлива в камере сгорания с целью снижения концентрации токсических компонентов в отработавших газах реализуется по принципу обратной связи (ПИД-регулирование) на основе информации, получаемой с датчика избытка кислорода (лямбда-зонда). Данный датчик, как правило, устанавливается в системе выпуска отработанных газов в выпускном коллекторе двигателя или в каталитическом нейтрализаторе. Информация, получаемая с датчика избытка кислорода, используется в системе управления для оценивания количества оставшегося свободного кислорода в отработавших газах в процентном отношении, что позволяет, в свою очередь, оценивать стехиометрический состав топлива, который для современных ДВС находится в диапазоне от 14,5 до 14,7 кг воздуха на один кг топлива. Если топливно-воздушная смесь «обогащается» (увеличивается количество топлива), то наблюдается импульсное снижение эффективности процесса нейтрализации угарного газа CO и углеводородов CH_x , если топливно-воздушная смесь «обедняется» – увеличивается количество оксидов азота NO_x .

На практике, процесс регулирования стехиометрического состава топливно-воздушной смеси осуществляется путем подачи в цилиндры двигателя массы топлива, обеспечивающей минимум функции J , характеризующей абсолютное по модулю расхождение между текущим (фактическим) значением датчика концентрации кислорода λ_t и его номинальным табличным значением λ_t^r , заранее определенным для каждого режима работы двигателя и хранящимся в специальной топливной таблице. Другими словами, регулируемым параметром является

концентрация свободного кислорода в отработавших газах. В качестве параметра управления используется продолжительность впрыскивания топлива в цилиндр τ . Численные значения параметра τ определяются путем перемножения базового значения n_a , так называемый, коэффициент коррекции количества топлива $Coef_{\lambda}$, подаваемого в цилиндр двигателя в зависимости от значений коэффициента λ . В качестве режимных параметров, или параметров, определяющих режимную точку, используют значения температуры охлаждающей жидкости, скорости движения автомобиля, частоты вращения коленчатого вала.

Для большинства современных автомобильных поршневых двигателей расстояние от выпускных клапанов газораспределительного механизма до мест установки датчика кислорода достаточно велико, кроме этого датчик обладает большой инерционностью. В результате этого в ходе эксплуатации не удастся обеспечить постоянство требуемого стехиометрического состава топливно-воздушной смеси [6, 7], что проявляется в увеличении токсичности отработавших газов. При этом постоянство стехиометрического состава не удастся обеспечить даже при работе двигателей на установившихся режимах работы (т.е. при постоянной величине момента сопротивления вращению коленчатого вала и постоянной частоте вращения коленчатого вала). Отклонение стехиометрического состава топливно-воздушной смеси от требуемых значений составляет от 3 до 7 %, что вызывает увеличение концентрации токсических компонентов в отработавших газах в среднем на 15 – 20 % [7, 8].

При работе двигателя на неустановившихся режимах работ при изменении положений режимной точки отклонения стехиометрического состава топливно-воздушной смеси от требуемых значений краткосрочно могут достигать 20 %. Последнее вызывает нарушение работы λ -регулятора, проявляющееся в значительном отклонении состава смеси от требуемого, и, как следствие, снижение эффективности работы каталитического нейтрализатора. Во избежание этого в двигателях зарубежного производства, например, в двигателях серии *Pentastar 3.6* λ -регулирование проводят в окрестности стационарной режимной точки, исходя из предположения стационарности каждого текущего режима работы двигателя [7]. По мнению авторов, требуемые параметры регулирования могут быть обеспечены введением в цепь управления звена прогнозирования значений коэффициента коррекции топлива на основании результатов λ -регулирования, реализованных на предыдущем шаге, информация о которых хранится в динамических таблицах значений коэффициентов коррекции подачи топлива (Рис.1).

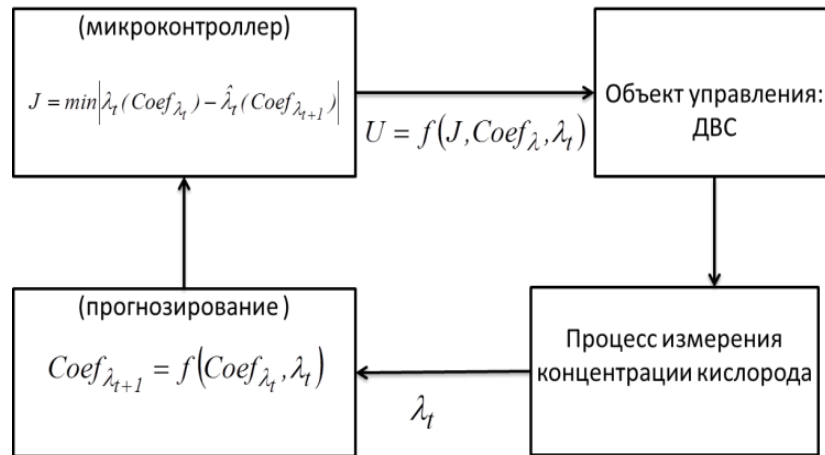


Рис.1 – Предлагаемая схема управления длительностью впрыска топлива

Для реализации предлагаемой схемы управления (**Рис.1**) необходимо разработать прогнозирующую математическую модель, позволяющую рассчитывать прогнозные значения коэффициента топливной коррекции по его текущему значению с учетом текущего и предшествующего значений датчика концентрации кислорода. Вычислительный процесс идентификации структуры и параметров прогнозирующей модели предлагается строить на основе эмпирического метода индуктивной самоорганизации, предложенного Ю.В. Подвинцевым в работах [12, 13], в основе которого лежит принцип постепенного (от ряда к ряду) наращивании сложности модели или полном переборе всех возможных моделей и выборе лучших среди них по информационному критерию Кульбака.

Реализацию подхода к моделированию рассмотрим на примере анализа результатов измерений ста последовательных значений концентрации кислорода в выпускном коллекторе, измеренных лямбда-зондом, и ста значений коэффициента топливной коррекции для четырехцилиндрового шестнадцати клапанного автомобильного двигателя объемом 1399 см³ (**Рис.2**).

Последовательности изменений значений исследуемых параметров (**Рис.2**) представляют случайные стационарные процессы. Отметим, что визуально в результатах измерений определяется некоторая периодическая составляющая, обусловленная необходимостью периодически создавать для поддержания работоспособности лямбда-зонда избыточную, по отношению к стехиометрическому составу, концентрацию кислорода.

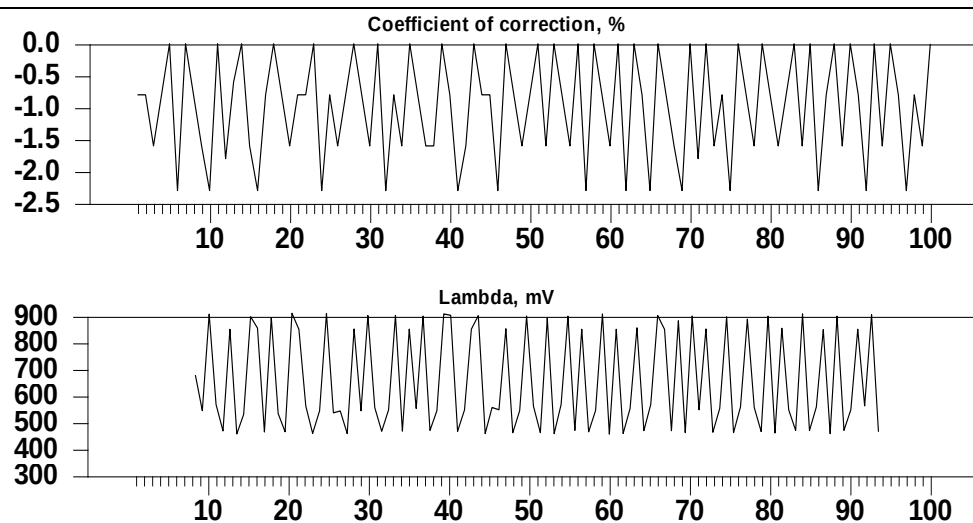


Рис.2 –Процессы изменения коэффициента коррекции топлива (верхний график) и показаний датчика кислорода (нижний график)

Первый этап моделирования сводится к оцениванию периодичности исследуемого процесса с целью выявления основной тенденции в его развитии. Выявление периодичности в исследуемом сигнале проведено с помощью спектрального анализа и прикладного программного обеспечения *Statistica 6.0* [9]. По методике работы [9] анализом периодограмм (рис.3), отражающих распределение дисперсий случайных процессов между различными гармоническими компонентами, выявлены периодические и случайные составляющие исследуемых процессов, а также определены основные тенденции в их развитии (**Рис.4**).

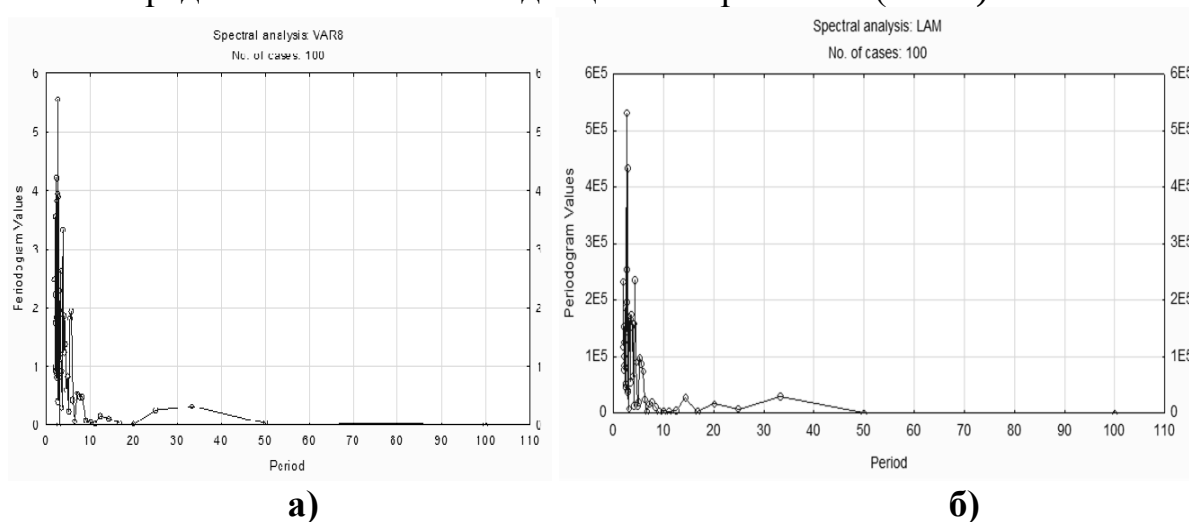


Рис.3 – Периодограммы:
а) – процессов изменения концентрации кислорода (слева);
б) – коэффициента топливной коррекции (справа)

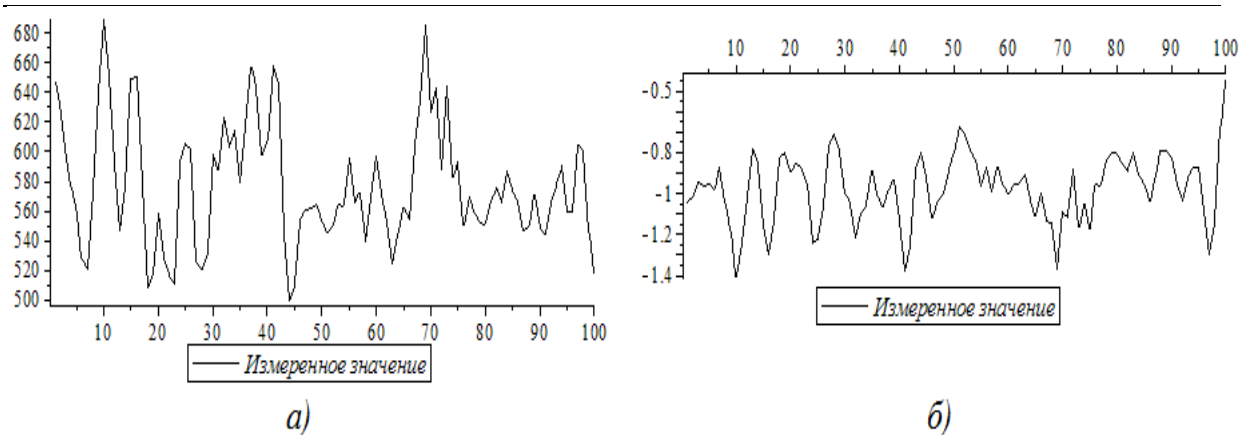


Рис.4 – Тенденции в изменении исследуемых процессов:
а) – процесса λ , б) – процесса *Coef*

На следующем шаге моделирования оцениваются статистические характеристики выявленных на предыдущем шаге тенденций. Так на **Рис.5** показаны графики, которые иллюстрируют изменение выборочного среднего и выборочной дисперсии исследуемых тенденций.

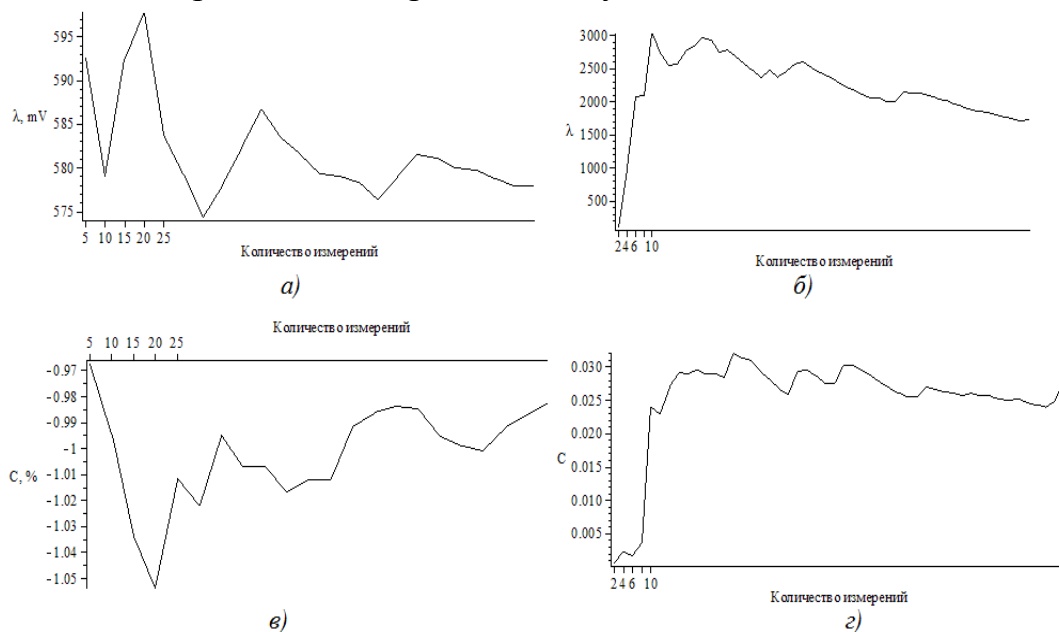


Рис.5 – Статистические характеристики процессов: а) – выборочное среднее λ , б) – выборочная дисперсия λ , в) – выборочное среднее *Coef*, г) – выборочная дисперсия *Coef*

Завершающий этап моделирования связан с подбором структуры и расчетом параметров модели, отражающей причинно-следственную динамическую зависимость между текущими и прошлыми значениями коэффициента топливной коррекции и показателями лямбда-зонда.

Используя алгоритм, детально описанный в работе [10], получена эмпирическая регрессионная модель, позволяющая прогнозировать значения коэффициента топливной коррекции в зависимости от его текущего значения и значений датчика концентрации кислорода на текущем и предыдущем шаге:

$$C_{t+1} = 0,671 \cdot C_t - 0,00338 \cdot \lambda_t + 0,00239 \cdot \lambda_{t-1} + 0,247 + \varepsilon_t, \quad (2)$$

где ε_t -- погрешности моделирования, C_t – значения коэффициента топливной коррекции в текущий дискретный момент времени, λ_t – значения показаний лямбда-зонда в текущий дискретный момент времени.

Проверка адекватности математической модели (2) реальным экспериментальным данным проведена сопоставительным анализом реальных и расчетных значений. Результаты сопоставительного анализа представлены на **Рис.6-8**.

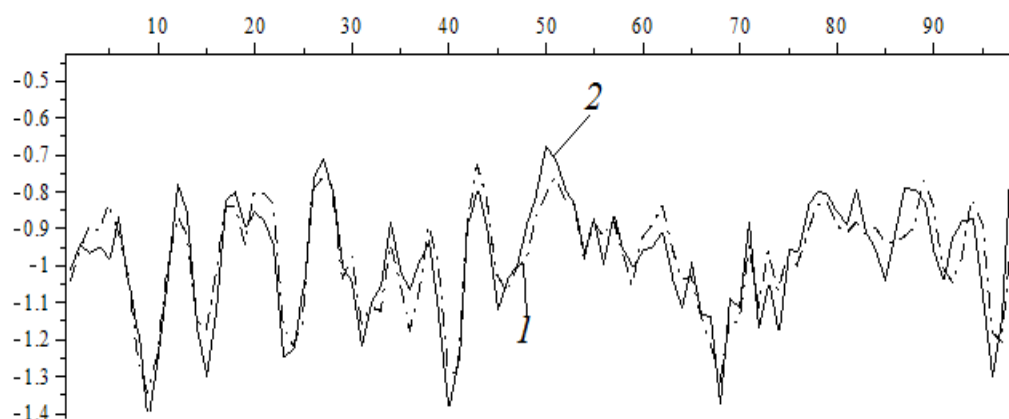


Рис.6 – Расчетное (1) и измеренное (2) значение коэффициента топливной коррекции

На **Рис.7** представлены результаты расчета относительной абсолютной процентной ошибки моделирования, используя следующую формулу:

$$MAE_t = \left| \frac{C_t - \hat{C}_t}{C_t} \right| \cdot 100\% \quad (3)$$

Анализ численных значений относительных ошибок моделирования, а также анализ их автокоррелограммы (**Рис.7,8**) позволяют выдвинуть гипотезу об адекватности построенной модели экспериментальным данным, а также выдвинуть предположение о возможности использования уравнения (2) для расчета значений коэффициента топливной коррекции в ходе управления процессом смесеобразования ДВС.

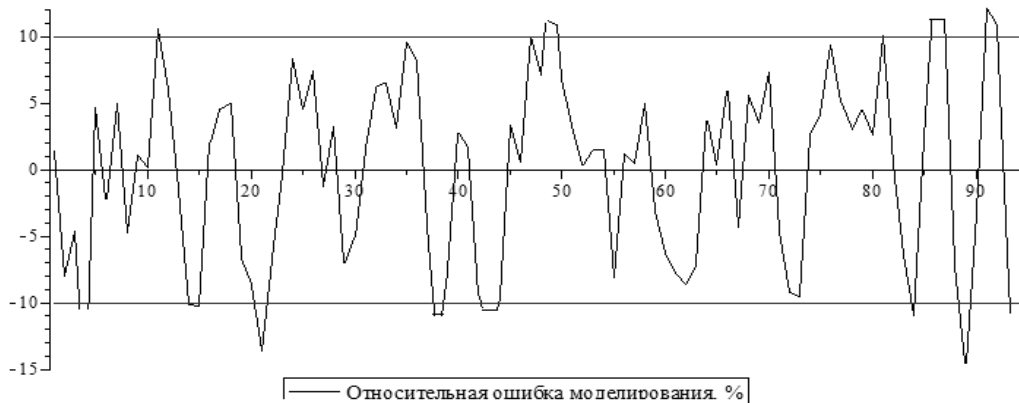


Рис.7 – Относительные ошибки моделирования

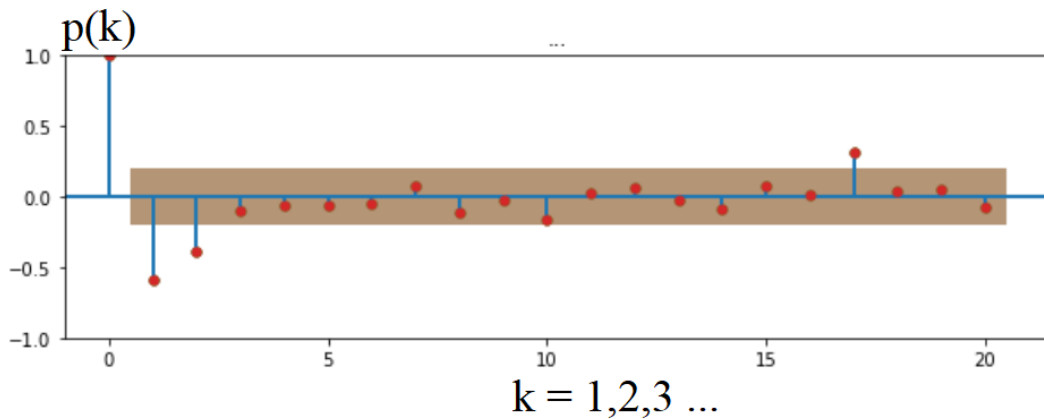


Рис.8 – Автокорреляционная функция ошибок моделирования

К основным преимуществам модели (2) можно отнести ее вычислительную простоту, а также то, что она может быть использована для отладки, калибровки и, как следствие, улучшения характеристик системы управления соотношением воздух-топливо новых двигателей после сборки и приемосдаточных испытаний без внесения существенных изменений в действующий технологический процесс. Кроме этого, предложенная эмпирическая модель зависимости коэффициента топливной коррекции от концентрации кислорода в отработавших газах может быть использована в качестве инструмента при управлении составом топливно-воздушной смеси в ДВС с целью снижения концентрации токсических компонентов в отработавших газах.

Заключение.

Применение рассмотренного подход в ходе эксплуатации поршневых двигателей позволит обеспечить снижение концентрации токсических

компонентов путем введения обратной связи по величине концентрации кислорода в отработанных газах с учетом прогнозных значений параметров, характеризующих качество процесса горения в камере сгорания при одновременном обеспечении топливной экономичности и мощности на основе определения рациональных значений длительности впрыскивания топлива.

Библиографический список

1. Калинин В.Ф. Снижение токсичности выбросов дизельных двигателей путем применения электроадаптивной системы термостабилизации топлива / В.Ф. Калинин, А.В. Щегольков // Университет им. В.И. Вернадского. – 2008. – №3(13). Том 2. – С.173 - 179.
2. Pervukhina E. Lowering toxic concentrations in the diesel exhaust gases / E. Pervukhina, K. Osipov, V. Golikova // Communications in Computer and Information Science, Special Issue “Optimization in the Natural Sciences,” 30th Euro Mini-Conference, EmC-ONS 2014. – 2015. – pp. 118-128.
3. Klimenko A. Aggregated toxicity of road vehicles as basis for future regulation in the field of atmospheric air protection / A. Klimenko // SN Applied Sciences. – 2020. – Т.2. №12.
4. Lopatin O.P. Integrated Diesel Engine Toxicity Reduction System / O.P. Lopatin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2020. – С. 12199.
5. Mollenhauer K. Handbook of diesel engine / K. Mollenhauer, H. Tschoeke. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 636 p.
6. Мигуш С.А. Разработка математической модели инжекторного двигателя / Мигуш С.А., Д.Н. Герасимов, В.О. Никифоров // Научно-технический вестник «Информация и управление в технических системах» – 2003. – №10. – С.10 - 18.
7. Постоловский В. Диагностика по сигналу лямбда зонда / В. Постоловский // Автомастер. – 2006. – №12 – С.13 – 16.
8. Кулешов А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А.С. Кулешов, Л.В. Грехов // М. МГТУ – 2000. – 64с.
9. Гирявец. А.К. Теория управления автомобильным бензиновым двигателем / А.К. Гирявец. – М. ППП «Рисский сервис», 1997 – 161 с.
10. Голикова В.В. Методы многомерного статистического анализа в задачах контроля качества сборки машиностроительных изделий // В.В.

-
- Голикова, Е.Л. Первухина / сб. докладов междунар. науч.-техн. семинара 20-21 октября 2011 г., г. Москва, 2011 – С.153 – 160.
11. Первухина Е.Л. Обнаружение дефектов машиностроительных изделий в ходе приемосдаточных испытаний / Е.Л. Первухина, В.В. Голикова, К.Н. Осипов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – №5 – С. 97 - 105.
12. Разработка методики оптимального сбора и обработки информации на ЦВМ при исследовании эффективности антикоррозионной защиты материалов морских судов: отчет о НИР: № 518 / Севастоп. приборостроит. ин-т ; рук. работы Ю.В. Подвинцев. – 1973. – 40 л.
13. Создание информационно-измерительной системы на базе МУИС ИЗОТ-1016-С для обеспечения функционирования автоматизированного радиоцентра: отчет о НИР: № 1143 / Севастоп. приборостроит. ин-т ; рук. работы Ю. В. Подвинцев. – 1987. – 48 л. : ил.

Bibliograficheskiy spisok

1. Kalinin V.F. Snizhenie toksichnosti vybrosov dizel'nyh dvigatelej putem primeneniya elektroadaptivnoj sistemy termostabilizacii topliva / V.F. Kalinin, A.V. SHCHegol'kov // Universitet im. V.I. Vernadskogo. – 2008. – №3(13). Tom 2. – S.173 - 179.
2. Pervukhina E. Lowering toxic concentrations in the diesel exhaust gases / E. Pervukhina, K. Osipov, V. Golikova // Communications in Computer and Information Science, Special Issue “Optimization in the Natural Sciences,” 30th Euro Mini-Conference, EmC-ONS 2014. – 2015. – pp. 118-128.
3. Klimenko A. Aggregated toxicity of road vehicles as basis for future regulation in the field of atmospheric air protection / A. Klimenko // SN Applied Sciences. – 2020. – T.2. №12.
4. Lopatin O.P. Integrated Diesel Engine Toxicity Reduction System / O.P. Lopatin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2020. – S. 12199.
5. Mollenhauer K. Handbook of diesel engine / K. Mollenhauer, H. Tschoeke. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 636 p.
6. Migush S.A. Razrabotka matematicheskoy modeli inzhektornogo dvigatelya / Migush S.A., D.N. Gerasimov, V.O. Nikiforov // Nauchno-tekhnicheskij vestnik «Informaciya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemah» – 2003. – №10. – S.10 - 18.
7. Postalovskij V. Diagnostika po signalu lyambda zonda / V. Postalovskij // Avtomaster. – 2006. – №12 – S.13 – 16.

8. Kuleshov A.S. Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternaya optimizaciya toplivopodachi i rabochih processov dvigatelej vnutrennego sgoraniya / A.S. Kuleshov, L.V. Grekhov // M. MGTU – 2000. – 64s.
9. Giryavec. A.K. Teoriya upravleniya avtomobil'nyim benzinovym dvigatelem / A.K. Giryavec. – M. PPP «Rissskij servis», 1997 – 161 s.
10. Golikova V.V. Metody mnogomernogo statisticheskogo analiza v zadachah kontrolya kachestva sborki mashinostroitel'nyh izdelij // V.V. Golikova, E.L. Pervuhina / sb. dokladov mezhdunar. nauch.-tekhn. seminar. 20-21 oktyabrya 2011 g., g. Moskva, 2011 – S.153 – 160.
11. Pervuhina E.L. Obnaruzhenie defektov mashinostroitel'nyh izdelij v hode priemosdatochnyh ispytaniy / E.L. Pervuhina, V.V. Golikova, K.N. Osipov // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. – 2010. – №5 – S. 97 - 105.
12. Razrabotka metodiki optimal'nogo sbora i obrabotki informacii na CVM pri issledovanii effektivnosti antikorrozionnoj zashchity materialov morskikh sudov: otchet o NIR: № 518 / Sevastop. priborostroit. in-t ; ruk. raboty YU.V. Podvincev. – 1973. – 40 l.
13. Sozdanie informacionno-izmeritel'noj sistemy na baze MUIS IZOT-1016-S dlya obespecheniya funkcionirovaniya avtomatizirovannogo radiocentra: otchet o NIR: № 1143 / Sevastop. priborostroit. in-t ; ruk. raboty YU. V. Podvincev. – 1987. – 48 l. : il.

¹*Скатков Иван Александрович, к.т.н., доцент, IASkatkov@sevsu.ru, Россия, Севастополь Севастопольский государственный университет*

²*Осипов Константин Николаевич, к.т.н., доцент, KNOsipov@sevsu.ru, Россия, Севастополь Севастопольский государственный университет*

OPTIMIZING THE PERFORMANCE OF THE AIR-FUEL RATIO CONTROL SYSTEM IN RECIPROCATING ENGINES

I.A. Scatkov, K.N. Osipov

Empirical relationships between fuel ratio correction value and the concentration of oxygen in the engine exhaust gases are created. They form a basis to control the fuel mixture composition and to reduce the concentration of toxic components.

Key words: optimization, piston engines, fuel correction factor.

*Scatkov Ivan Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent,
IASkatkov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university*

*Osipov Konstantin Nikolaevich. candidate of technical sciences, docent,
KNOsipov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university*

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА ГИБКОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ С НАКОПИТЕЛЕМ В ВИДЕ ЛОТКА С АКТИВНЫМ ОРИЕНТИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Карташов Л.Е.

***Аннотация.** разработана имитационная модель функционирования участка автоматической линии, состоящего из двух станков и ориентирующего лотка между ними. На основе модели определены конструктивные параметры лотка, обеспечивающие максимальную производительность.*

***Ключевые слова.** имитационная модель, ориентирующий лоток, гибкая автоматическая линия.*

Сложность моделирования гибких автоматических линий (ГАЛ), которые являются частным, но наиболее распространенным видом гибких производственных систем, заключается в том, что они характеризуются сложной иерархической структурой и выполняют большое количество операций в условиях недетерминированной среды. Эффективность применения ГАЛ зависит от показателей ее функционирования, важнейшим из которых является производительность, а ключевым фактором, влияющим на производительность системы, является ее надежность.

Одним из способов повышения надежности ГАЛ, не требующих привлечения существенных капиталовложений, является применение временного резервирования основного технологического оборудования посредством введения межоперационных накопителей, вследствие чего увеличивается способность ГАЛ продолжать функционирование при выходе из строя каких-либо ее элементов.

При анализе функционирования ГАЛ возникает ряд задач, связанных с планированием компоновочных схем линий с учетом влияния возникающих расходов при известных значениях параметров основного и вспомогательного оборудования. Такие задачи могут рассматриваться как на этапе проектирования линий, так и при переналадке на выпуск изделий новой номенклатуры, и должны решаться на базе адекватных математических моделей, как аналитических, так и имитационных.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве моделей [1,2] накопители считаются абсолютно надежными. Основная причина такого допущения в том, что учет надежности накопителя значительно усложняет

аналитическую модель, что приводит к невозможности получить аналитическое решение. В лучшем случае, принимается допущение, что накопитель может отказать с определенной заданной вероятностью [3,4].

Если провести анализ накопителей различных конструкций [5–7], то вполне очевидно, что их отказы будут гораздо сложнее. Наиболее очевидны следующие виды отказов накопителей:

- прием изделий невозможен в накопителе, но имеющийся в накопителе запас деталей может поступать на следующее технологическое оборудование;
- прием изделий возможен, но детали не могут поступать на следующее технологическое оборудование;
- накопитель полностью недоступен и для приема, и для выдачи деталей;
- отказ накопителя ведет к потере всего запаса накопителя (хотя данный вид отказов более характерен для систем обработки информации).

Следует отметить, что наиболее эффективно задачи автоматической загрузки и транспортирования могут быть решены с помощью вибрационных автоматических загрузочных устройств [8, 9], которые, из-за отсутствия в них движущихся частей, исключают интенсивное ворошение массы деталей и их соударение, просты по конструкции, обладают сравнительно низкой энергоемкостью, имеют возможность регулирования скорости перемещения в широких пределах.

Лотковые загрузочные устройства предназначены для сохранения ориентированного положения деталей при их доставке к месту или для обеспечения окончательной ориентации предметов обработки. К достоинствам данных устройств можно отнести удобство транспортировки длинномерных деталей; возможность перемещать детали на значительное расстояние; малые габариты; простота конструкции и наладки; широкие возможности использования в составе технологического оборудования. Кроме этого, такие устройства могут выступать в качестве промежуточных накопителей.

В вибрационных лотках осуществляется как первичное, так и вторичное ориентирование деталей [10]. Вторичное ориентирование – процесс, в результате которого происходит уменьшение числа различных положений деталей до одного требуемого. Процесс вторичного ориентирования может осуществляться пассивным или активным способом. При пассивном ориентировании происходит удаление в навал деталей, имеющих неправильное положение. Активное ориентирование осуществляется поворотом деталей в требуемое положение.

Устройства пассивного ориентирования основаны на использовании особенностей конфигурации деталей, отличий в габаритных размерах и положения центра тяжести.

Активное ориентирование может осуществляться под действием гравитационных сил или принудительно – воздействием на перемещаемые детали струй воздуха или электромагнитных полей. Простейший случай активного гравитационного ориентирования – ориентирования деталей типа болт. Два устойчивых положения деталей, полученных после первичного ориентирования, приводятся к одному опрокидыванием болта в вырез лотка.

При этом основным видом отказов будет следующий. Рассмотрим вибролоток с ориентирующим ножом для вторичной ориентации втулок со шлицом [5]. Перед ориентирующим ножом лотка в шахматном порядке установлены пластины с коэффициентом трения, отличным от коэффициента трения дна лотка. При взаимодействии торца детали, с пластинами и лотком, имеющими различный коэффициент трения, возникает крутящий момент относительно оси детали. Детали перед ножом приобретают вращение вокруг осей и как только паз детали совмещается с ножом, происходит их ориентирование. Достаточно часто именно на ориентирующем элементе происходит заклинивание детали, вызывая этим простой ГАЛ. Можно предположить, что время простоя и, как следствие, производительность ГАЛ, зависят не только от емкости лотка, но и от расположения ориентирующего элемента. При этом если участок лотка до ножа не полностью заполнен, то предыдущий станок имеет возможность передавать детали в лоток, и если на участке лотка после ориентации еще имеются детали, то последующий станок имеет возможность их получать.

Поставим следующую задачу: разработать модель функционирования участка ГАЛ, состоящего из двух станков и вибролотка в качестве накопителя с целью оценить производительность участка в зависимости от расположения ориентирующего элемента на лотке. Структурная схема модели представлена на **Рис.1**.

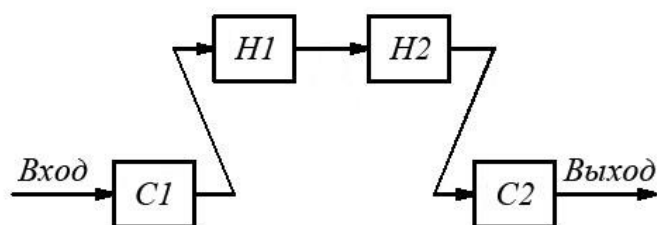


Рис.1 – Структурная схема модели участка ГАЛ

Здесь С1 и С2 – первый и второй станок соответственно, Н1 – участок вибрлотка до ориентирующего элемента, Н2 – после. В данном случае представляется целесообразным разработать имитационную модель. Целесообразность применения методов имитационного моделирования в задачах проектирования ГАЛ вызвана, во-первых, тем, что точность и достоверность результатов, полученных методами аналитического моделирования, не является достаточной из-за наличия ряда допущений, не реализуемых на практике, но обусловленных применением того или иного метода исследований. Во-вторых, наиболее полное исследование процесса функционирования ГАЛ могут быть проведены, если известны явные аналитические зависимости, связывающие искомые характеристики с параметрами системы. Применительно к решению задач проектирования получить такие зависимости практически невозможно. Существенное упрощение модели приводит к потере точности, что в случае проектирования может привести к значительному расхождению расчетных и реальных показателей, что понижает ценность аналитических методов. Кроме этого, имитационное моделирование позволяет воспроизводить последовательно во времени эволюцию состояния ГАЛ, что дает возможность вычислить средние значения характеристик производственного процесса, проследить изменение этих характеристик во времени, определить их максимальные и минимальные значения, получить точное представление о влиянии случайных отказов оборудования на поведение проектируемой системы.

Для реализации модели использован язык GPSS, в программной среде GPSS World Student Version 5.2.2. Единица модельного времени принята равной 1 минуте. Как было показано в [11], накопитель можно реализовать путем использования блока многоканального устройства, блока очереди с ограничением на её длину или последовательностью блоков одноканальных устройств с нулевым временем обслуживания. В данном случае накопитель с ориентирующим устройством был реализован в виде одноканального устройства с нулевым временем обслуживания с помощью операторов SEIZE, ADVANCE и RELEASE. Примем, что среднее время наработки на отказ станка составляет 120 минут и распределено экспоненциально, среднее время восстановления – 20 минут, и также распределено экспоненциально. Время обработки детали – 10 минут с отклонением 1 минута. Среднее время до отказа и восстановление ориентирующего устройства – 60 и 10 минут соответственно. Емкость накопителя примем равной 7 и произведём моделирование, размещая ориентирующее устройство в разных местах, после каждой ячейки накопителя. Моделирование осуществляется до момента выхода с линии

20 000 заявок. Фрагмент листинга программы на языке GPSS представлен ниже.

```
*****
*      Модель участка ГАЛ
*****
      GENERATE , , , 1
Label1  GATE NU Tool1      ;проверка незанятости станка 1
        GATE NU ToolRef1   ;проверка исправности станка 1
        SEIZE Tool1        ;занять станкок 1
        ADVANCE 10,1       ;обработка детали
        GATE NU StrDev1    ;проверка незанятости ячейки 1
        GATE NU StrRef1    ;проверка исправности ячейки 1
        RELEASE Tool1      ;освободить станкок 1
        SPLIT 1,Label1

        SEIZE StrDev1      ;занять ячейку 1 накопителя
        ADVANCE 0
        GATE NU StrDev2    ;проверка незанятости ячейки 2
        RELEASE StrDev1    ;покинуть ячейку 1 накопителя
* .....
        SEIZE StrDev7      ;занять ячейку 7 накопителя
        ADVANCE 0
        GATE NU Tool2      ;проверка незанятости станка 2
        GATE NU ToolRef2   ;проверка исправности станка 2
        RELEASE StrDev7    ;покинуть ячейку 7 накопителя

        SEIZE Tool2        ;занять станкок 1
        ADVANCE 10,1       ;обработка детали
        RELEASE Tool2      ;освободить станкок 1
        TERMINATE 1
*****
*      Моделирование отказов и восстановлений
*****
*      Отказ и восстановление станка 1
        GENERATE (Exponential(7,0,120))
        SEIZE ToolRef1
        ADVANCE (Exponential(2,0,20))
        TERMINATE
*      Отказ и восстановление станка 2
        GENERATE (Exponential(8,0,120))
        SEIZE ToolRef2
        ADVANCE (Exponential(6,0,20))
        TERMINATE
*      Отказ и восстановление ячейки 1 накопителя
        GENERATE (Exponential(3,0,60))
        SEIZE StrRef1
        ADVANCE (Exponential(4,0,10))
        TERMINATE
```

Результаты моделирования в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Положение ориентирующего элемента	Производительность, деталей/час
1	4,446
2	4,686
3	4,758
4	4,782
5	4,782
6	4,764
7	4,68

Из результатов моделирования видно, что при расположении ориентирующего устройства перед четвертой или пятой ячейкой лотка производительность достигает максимального значения. Зависимость производительности от местоположения ориентирующего элемента представлена на **Рис.2**.

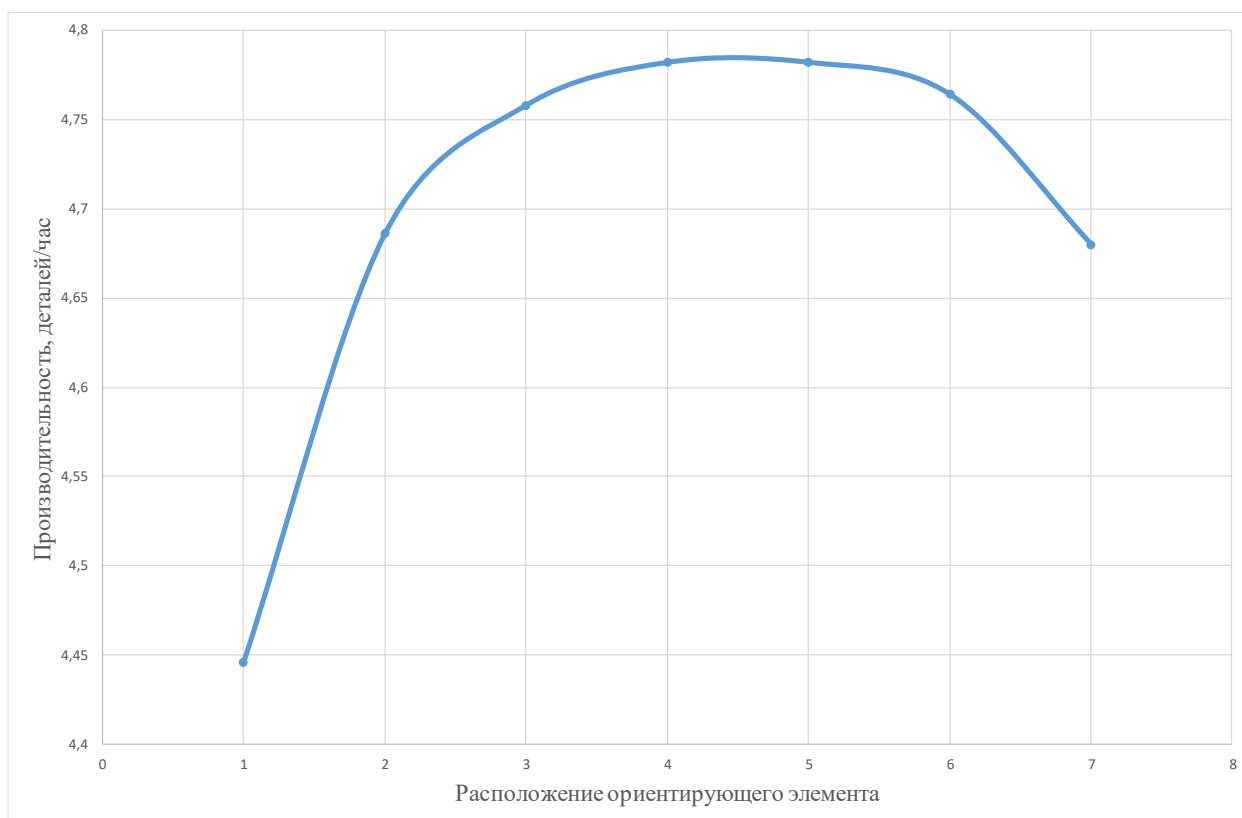


Рис.2 – Зависимость производительности от местоположения ориентирующего элемента лотка

Выводы.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы: производительность и надежность участка ГАЛ с активными ориентирующими транспортно-накопительными устройствами зависит от размещения ориентирующего элемента. Определение местоположения ориентирующего элемента с целью получения оптимальной производительности возможно с использованием имитационного моделирования, которое гораздо проще разработки аналитических моделей.

Дальнейшее направление исследований должно осуществляться по двум направлениям. Во-первых, это разработка альтернативных реализаций модели накопителя, например, с помощью операторов QUEUE или STORAGE, что позволит сократить трудозатраты на составление моделей, и автоматизация перебора вариантов при помощи PLUS-процедур. Во-вторых, представляет интерес исследование влияния времени наработки на отказ и восстановления накопителя и станков, емкости накопителя, времени обработки деталей на положение ориентирующего устройства с целью достижения максимальной производительности.

Библиографический список

1. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2000 – 284 с.
2. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных линий / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2006 – 240 с.
3. Хватов Б.Н. Гибкие производственные системы. Расчет и проектирование : учеб. пособие / Б.Н. Хватов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008 – 112 с.
4. Карташов А.Л. Модель гибкого производственного модуля, снабженного временным резервом, с учетом надежности накопителя / А.Л. Карташов, В.Я. Копп, Л.Е. Карташов // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управления. – 2014. – Вып. 146/2014. – С. 226-230.
5. Пашков Е.В. Транспортно-накопительные и загрузочные системы в сборочном производстве / Е.В. Пашков, А.Г. Карлов, В.Я. Копп. – Киев : УМК ВО, 1992 – 536 с.
6. Автоматическая загрузка технологических машин: справочник / Под общ. ред. И.А. Клусова – М. : Машиностроение, 1990 – 400 с.

7. Прейс В.В. Автоматические загрузочно-ориентирующие устройства. Ч. 1. Механические бункерные загрузочные устройства: учеб. пособие для вузов / В.В. Прейс, Н.А. Усенко, Е.В. Давыдова. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2006 – 125 с.
8. Рабинович А.Н. Автоматические загрузочные устройства вибрационного типа / А.Н. Рабинович, В.А. Яхимович, Б.Ю. Боечко – Киев : Техника, 1965 – 380 с.
9. Спиваковский А.О. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства / А.О. Спиваковский, И.Ф. Гончаревич – М. : Машиностроение, 1972 – 328 с.
10. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. – М. : Машиностроение, 1981 – 509 с.
11. Карташов Л.Е. Способы реализации накопителей имитационных моделях гибких автоматизированных линий / Л.Е. Карташов, А.Л. Карташов. – Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы международной научно-технической конференции, г. Севастополь 7-12 сентября 2009 г. – 2009. – С. 121-124.

Bibliograficheskiy spisok

1. Kopp V.YA. Stohasticheskie modeli avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s vremennym rezervirovaniem / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. – Sevastopol' : Izd-vo SevNTU, 2000 – 284 s.
2. Kopp V.YA. Modelirovanie avtomatizirovannyh linij / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. – Sevastopol' : Izd-vo SevNTU, 2006 – 240 s.
3. Hvatov B.N. Gibkie proizvodstvennye sistemy. Raschet i proektirovanie : ucheb. posobie / B.N. Hvatov. – Tambov : Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2008 – 112 s.
4. Kartashov A.L. Model' gibkogo proizvodstvennogo modulya, snabzhennogo vremennym rezervom, s uchetom nadezhnosti nakopitelya / A.L. Kartashov, V.YA Kopp., L.E. Kartashov // Vestnik SevNTU. Avtomatizaciya processov i upravleniya. – 2014. – Vyp. 146/2014. – S. 226-230.
5. Pashkov E.V. Transportno-nakopitel'nye i zagruzochnye sistemy v sborochnom proizvodstve / E.V. Pashkov, A.G. Karlov, V.YA. Kopp. – Kiev : UMK VO, 1992 – 536 s.
6. Avtomaticheskaya zagruzka tekhnologicheskikh mashin: spravochnik / Pod obshch. red. I.A. Klusova – M. : Mashinostroenie, 1990 – 400 s.

7. Prejs V.V. Avtomaticheskie zagruzочно-orientiruyushchie ustrojstva. CH. 1. Mekhanicheskie bunkernye zagruzочnye ustrojstva: ucheb. posobie dlya vuzov / V.V. Prejs, N.A. Usenko, E.V. Davydova. – Tula : Izd-vo TulGU, 2006 – 125 s.
8. Rabinovich A.N. Avtomaticheskie zagruzочnye ustrojstva vibracionnogo tipa / A.N. Rabinovich, V.A. YAhimovich, B.YU. Boechko – Kiev : Tekhnika, 1965 – 380 s.
9. Spivakovskij A.O. Vibracionnye konvejery, pitateli i vspomogatel'nye ustrojstva / A.O. Spivakovskij, I.F. Goncharevich – M. : Mashinostroenie, 1972 – 328 s.
10. Vibracii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti t. T. 4. Vibracionnye processy i mashiny / Pod red. E.E. Lavendela. – M. : Mashinostroenie, 1981 – 509 s.
11. Kartashov L.E. Sposoby realizacii nakopitelej imitacionnyh modelyah gibkih avtomatizirovannyh linij / L.E. Kartashov, A.L. Kartashov. – Avtomatizaciya: problemy, idei, resheniya: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, g. Sevastopol' 7-12 sentyabrya 2009 g. – 2009. – S. 121-124.

*Карташов Леонид Евгеньевич, к.т.н., доцент,
lekartashov@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь Севастопольский
государственный университет*

***SIMULATION MODEL OF A SECTION OF A FLEXIBLE AUTOMATIC
LINE WITH A STORAGE IN THE FORM OF A TRAY WITH AN ACTIVE
ORIENTING DEVICE***

L.E. Kartashov

A simulation model for the operation of a section of an automatic line has been developed, consisting of two machines and an orienting tray between them. Based on the model, the design parameters of the tray are determined to ensure maximum productivity.

Key words: simulation model, orienting tray, flexible automatic line.

*Kartashov Leonid Evgenievich, candidate of technical sciences, docent,
lekartashov@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ RPA ДЛЯ АНАЛИЗА РЫНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Цуканов А.В.

Аннотация. Рассматриваются возможности применения технологии программных роботов (RPA) для поиска и анализа информации в больших базах данных в интернете о состоянии рынка технологического оборудования. Дан анализ структуры получаемой информации. Предлагается использовать метод отсеивающего эксперимента для выбора значимых факторов, влияющих на функцию отклика. В частности, рассмотрено статистическое моделирование стоимости обрабатывающих центров от множества возможных параметров.

Ключевые слова. Технологическое оборудование, большие базы данных, автоматизация бизнес-процессов, статистическое моделирование, отсеивающие эксперименты.

Большие базы данных (Big Data) и технологии программных роботов (RPA) создали новые возможности для сбора статистического материала в реальном масштабе времени и анализа состояния рынка современных технологий в самых разных областях. В том числе появилась хорошая возможность получать много статистических данных в области инструментария обработки материалов из интернета. Исследование возможностей новых информационных инструментов для поддержки технологических областей в условиях огромного потока ненужной информации становится актуальной проблемой [2,3].

При этом часто исследователей и практиков интересует оценка влияния различных факторов на развитие современных технологий; в частности, для выбора направления создания новых технологических систем в области станкостроения. Например, важным направлением развития технологии обработки металла является создание и использование обрабатывающих центров.

Как правило, при исследовании сложных систем на главную исследуемую переменную может влиять бесконечное число факторов. При этом необходимость отсеивающих запросов к большим базам данных, которые можно считать экспериментальными опытами, связана с тем фактом, что, если какой-то значимый фактор в поисковой модели не учитывается, то это приводит к тому, что модель не достигает той цели, которая перед ней ставилась. Например, ошибка прогноза становится слишком большой или модель становится неадекватной и не может

использоваться для целей прогнозирования или оптимизации [2,7]. Это приводит к необходимости проведения предварительного исследования с целью отсеивания большей части незначимых факторов, что должно привести к упрощению модели и к повышению ее адекватности. В аналитических прогнозных исследованиях тенденций развития технологий, как правило, количество значимых эффектов значительно меньше общего числа факторов, учитываемых при построении модели. В процессе построения прогнозной модели большинство первоначально рассматриваемых факторов можно отнести к информационному шуму и при этом важно выделить немногие значимые факторы. Практически традиционной ошибкой измерения при проведении запросов к базе данных нет, то есть при повторном запросе мы получим такую же информацию, если не изменилась база данных. Неопределенность экспериментов с большими базами данных связана с количеством исследуемых переменных, размером выборки и изменчивостью объекта исследования во времени [6].

Число опытов – общее количество запросов к базе данных можно снизить, если использовать дополнительные ограничения на модель. Например, на первом этапе можно использовать только линейную модель или модель с взаимодействиями факторов без членов более высокого порядка.

Целью настоящего исследования является оценка **возможностей сбора и анализа с помощью технологии RPA [4] информации, имеющейся в интернете, о технических параметрах оборудования, в частности обрабатывающих центров, которое предполагается использовать при строительстве новых производственных мощностей.**

Программный робот в круглосуточном режиме просматривает интернет и формирует локальную базу данных о параметрах имеющихся в продаже обрабатывающих центров. На **Рис.1** показан фрагмент страницы сайта, которая является исходной для дальнейшего скачивания информации об интересующем виде обрабатывающего центра.

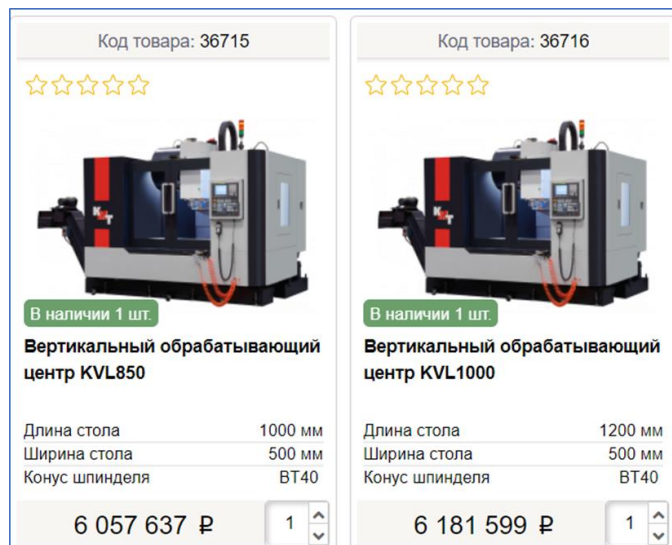


Рис.1 – Начальная информация для формирования базы данных в интернете

Робот в автоматическом режиме проходит по всем связанным с найденной страницей ссылкам и скачивает в форме электронной таблицы Excel параметры исследуемого центра. Пример полученной таблицы данных показан на **Рис.2**.

Параметры	kvl850	kvk850	kvl1000
Размеры рабочего стола, мм	1000x500	1000x500	1200x500
Перемещение по осям X/Y/Z	850x560x650	850x560x650	1000x610x650
Наибольшая нагрузка на стол, кг	600	600	600
Диапазон скорости вращения шпинделя, об/мин	8000	8000	8000
Максимальный крутящий момент, Нм	52,5	52,5	52,5
Мощность шпинделя, кВт	11..15	11..15	11..15
Т-пазы стола	18x5	18x5	18x5
Расстояние от торца шпинделя до поверхности рабочего стола, мм	150-800	150-800	150-800
Тип направляющих	качения	качения	качения
Быстрые перемещения по осям X/Y/Z, м/мин	32/32/30	32/32/30	32/32/30
Точность позиционирования, мм	± 0,005	± 0,005	± 0,005
Повторяемость, мм	± 0,003	± 0,003	± 0,003
Скорость подачи, м/мин	20	20	20
Тип хвостовика инструмента	BT40	BT40	BT40
Емкость магазина инструмента	24 (тип рука)	24 (тип рука)	24 (тип рука)
Время смены инструмента, сек	2,5	2,5	2,5
Давление воздуха, Мпа	0,5-0,7	0,5-0,7	0,5-0,7
Габаритные размеры, мм	4400x2600x3000	4400x2600x3000	4400x2600x3000
Масса KVL850 (4х осевой) нетто, кг	5800	5800	5900
Цена, руб.	7586508	6057637	6181599

Рис.2 – Пример первоначального вида полученных данных

Данные в первоначальном виде содержат как числовые данные, так и символьные данные. При этом в одной ячейке электронной таблицы могут содержаться несколько информационных единиц.

На втором этапе предварительной обработки полученных данных робот приводит данные к виду пригодному для математического моделирования. Текстовые данные удаляются, множественные данные в ячейках размещаются в нескольких строках. Пример фрагмента электронной таблицы с преобразованными данными показан на **Рис.3**.

Факторы		kvI850	kvk850	kvI1000
Размер1 рабочего стола, мм	X1	1000	1000	1200
Размер2 рабочего стола, мм	X2	500	500	500
Перемещение по оси X	X3	850	850	1000
Перемещение по оси Y	X4	560	560	610
Перемещение по оси Z	X5	650	650	650
Наибольшая нагрузка на стол, кг	X6	600	600	600
Диапазон скорости вращения шпинделя, об/мин	X7	8000	8000	8000
Максимальный крутящий момент, Нм	X8	52,5	52,5	52,5
Мощность шпинделя, кВт мин	X9	11	11	11
Мощность шпинделя, кВт макс	X10	15	15	15

Рис.3 – Пример преобразованных данных роботом

В таблице добавлен еще один столбец с обозначениями факторов.

Метод случайного баланса. В свою очередь поиск прогнозных регрессионных моделей, как правило, состоит из нескольких этапов. На первом предварительном этапе необходимо отсеять незначимые факторы и найти реально влияющие на функцию отклика значимые. Например, при поиске информации о зависимости стоимости обрабатывающих центров от их конструктивных параметров важно отсеять несущественные параметры. На последующих этапах модель можно уточнить и усложнить в случае необходимости. В связи с этим на этапе отсеивания незначимых факторов нет необходимости рассматривать все возможные уровни факторов. Можно брать только два уровня и использовать простейшие линейные модели.

Согласно теории оптимального эксперимента [1,7] обозначим нижний уровень фактора, как -1, и верхний уровень как +1.

В этом случае план эксперимента по запросам к базе данных можно представить в виде матрицы [5], показанной на **Рис.4**.

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+
+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	
-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+

Рис.4 - Фрагмент плана эксперимента с двумя уровнями факторов

Здесь переменные $x_1 - x_{11}$ задают не только кодированные значения факторов, но и значения линейных взаимодействий факторов. Включение взаимодействий в модель еще больше увеличивает ее размерность и число неизвестных параметров, которые должны быть оценены.

Число строк этой матрицы или число опытов N равно числу полученных результатов каждого параметра обрабатывающего центра в базе данных. В литературе при этом предлагается использовать сверхнасыщенный план эксперимента [1,5], то есть число исследуемых факторов (включая взаимодействия) k больше числа опытов N . В таком случае число степеней свободы становится отрицательным и невозможно использовать стандартные методы регрессионного анализа.

В традиционных экспериментах обычно используется метод случайного баланса. Впервые метод случайного баланса был предложен Сатерсвайтом в 1956 году и подробно описан в работе [8]. Суть метода заключается в том, что если брать определенным случайным образом данные, то при малом числе значимых эффектов имеется возможность сбалансировать случайное воздействие незначимых факторов, отнести их влияние к шуму и на фоне этого шума определить значимые факторы.

В методе случайного баланса предполагается, что если факторы, влияющие на функцию отклика расположить в порядке убывания их значимости, то получим экспоненциальную зависимость, показанную на Рис.5 (Взято из работы [1]).

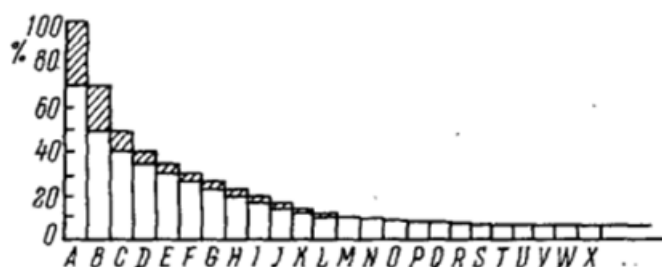


Рис.5 – Диаграмма зависимости вариации функции отклика [1]

На основании полученного ряда значений критерия значимости, можно задать граничный уровень этого критерия и выбрать нужное небольшое число влияющих факторов.

Обозначим значимые факторы в модели, включая взаимодействия, как x_i ($i = 1, 2, \dots, k-m$), а незначимые факторы, как z_j ($j=1, 2, \dots, m$). Получим следующую линейную модель [9]:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_{k-m} x_{k-m} + \alpha'_1 z_1 + \alpha'_2 z_2 + \dots + \alpha'_m z_m + \varepsilon,$$

ε - случайная переменная, включающая влияние не учтенных факторов.

Часть модели с незначимыми факторами и переменную ε можно объединить в одну условную случайную переменную

$$u = \alpha'_1 z_1 + \alpha'_2 z_2 + \dots + \alpha'_m z_m + \varepsilon,$$

Теперь можно с помощью регрессионного анализа оценить первые $k-m$ коэффициентов линейной модели для значимых факторов, но с новой случайной составляющей

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_{k-m} x_{k-m} + u.$$

Понятно, что ошибка оценивания оставшихся $k-m$ коэффициентов модели возрастает, но данный метод случайного баланса позволяет выделить значимые переменные и оценить их влияние при $k > N$.

Особенностью анализируемых статистических данных об обрабатывающих центрах является тот факт, что многие исследуемые факторы изменяются не на двух, а на нескольких уровнях.

Для сведения этих данных к задаче отсеивающего эксперимента с двумя уровнями факторов можно использовать следующий прием. Пусть фактор x_i изменяется на p уровнях. В этом случае вместо реальных значений этого фактора в матрицу планирования отсеивающего эксперимента вставляются p индикаторов (виртуальных факторов) $d_1, d_2, \dots, d_p$, которые принимают значение 0, если в данном опыте фактор x_i не находится на соответствующем уровне и 1, если находится.

Например, фактор «Точность позиционирования» для обрабатывающих центров в конкретном наборе данных принимал такие пять значений: 1, 2, 3, 4 и 5 Мкм. В этом случае вместо одного фактора, который имеет пять уровней, в матрицу планирования можно включить пять виртуальных индикаторов. Фрагмент такой матрицы планирования для рассматриваемого фактора показан на **Рис.6**.

	X17				
№ опыта	d1	d2	d3	d4	d5
1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1

Рис.6 - Фрагмент матрицы плана с заменой уровней

Теперь матрица плана эксперимента содержит факторы только на двух уровнях и можно использовать классические методы планирования отсеивающих экспериментов [1,6]. Метод введения виртуальных индикаторных переменных позволяет также оценить и нелинейные эффекты факторов.

На **Рис.7** показан график распределения функции отклика в зависимости от уровней шести выбранных факторов [5]. Данные были получены с использованием программного робота PIX [10].

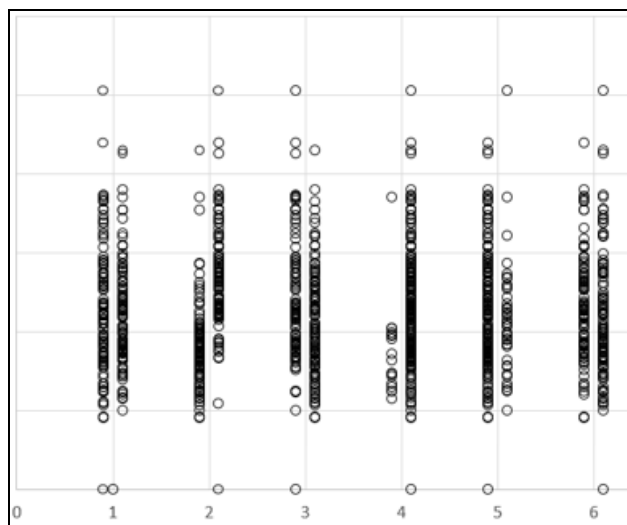


Рис.7 – Фрагмент результатов метода случайного баланса

На графике видно, что не все факторы влияют на цену обрабатывающего центра равной степени. Анализ размаха и медианы показывает, что второй и четвертый факторы оказывают максимальное влияние на функцию отклика.

Выводы.

Результаты исследования показали, что использование технологии RPA и метода планирования отсеивающего эксперимента для моделирования и анализа данных из интернета могут дать реальные результаты.

Представляется перспективным дальнейшие исследования рынка технологического оборудования с помощью современных информационных технологий и традиционных статистических методов.

Библиографический список

1. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова– М.: Наука, 1965. – 340 с.
2. Цуканов А.В. Статистическое моделирование и оптимизация бизнес-процессов / А.В. Цуканов, М.В. Потанина// Друкеровский вестник. – 2018ю – №1. – С.118-128.
3. Цуканов А.В. Планирование экспериментов в больших базах данных / А.В. Цуканов // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении: сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. – С.251-254.
4. Цуканов А.В. БОТ технологии для последовательного статистического анализа в больших базах маркетинговых данных / А.В. Цуканов, Н.А. Русина, Х.Х. Чан // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении: сборник трудов VI международной научно-практической конференции.– Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2021. – С.7-15.
5. Цуканов А.В. Отсеивающие эксперименты с большими экономическими базами данных / А.В. Цуканов, Н.А. Русина // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 2 (151). – С. 1013-1018.
6. Drovandi C.C. Principles of Experimental Design for Big Data Analysis / C.C. Drovandi, C. Holmes, J.M. McGree, K. Mengersen, S. Richardson, E.G. Ryan // Stat. Sci. – 2017. – 32(3). – P. 385–404.
7. Herzberg A.M. The design of experiments for model selection: minimization of the expected mean-squared error / A.M. Herzberg, A.V. Tsukanov // Utilitas mathematica. – 1995. – vol.47. – P. 85-96.
8. Satterthwaite F.E. Random Balance Experimentation / F.E. Satterthwaite // Technometrics. – 1959. – V.1.N2. – P. 111-137.
9. Tsukanov A.V. Integrated statistical and information models of systems with databases / A.V. Tsukanov // Advances in modeling & analysis. – 1995. – Ser.B. V.34. N2. – P. 27-34.

-
10. PIX Robotics.- [Электрон. ресурс].-Режим доступа: <https://pix.ru/company>.

Bibliograficheskij spisok

1. Nalimov V.V. Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nyh eksperimentov / V.V. Nalimov, N.A. Chernova– M.: Nauka, 1965. – 340 s.
2. Cukanov A.V. Statisticheskoe modelirovanie i optimizaciya biznes-processov / A.V. Cukanov, M.V. Potanina// Drukerovskij vestnik. – 2018yu – №1. – S.118-128.
3. Cukanov A.V. Planirovanie eksperimentov v bol'shih bazah dannyh / A.V. Cukanov // Informacionnye sistemy i tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: sbornik materialov IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Simferopol': IT «ARIAL», 2019. – S.251-254.
4. Cukanov A.V. BOT tekhnologii dlya posledovatel'nogo statisticheskogo analiza v bol'shih bazah marketingovyh dannyh / A.V. Cukanov, N.A. Rusina, H.H. Chan // Informacionnye sistemy i tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: sbornik trudov VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii.– Simferopol' : IT «ARIAL», 2021. – С.7-15.
5. Cukanov A.V. Otseivayushchie eksperimenty s bol'shimi ekonomicheskimi bazami dannyh / A.V. Cukanov, N.A. Rusina // Ekonomika i predprinimatel'stvo. – 2023. – № 2 (151). – С. 1013-1018.
6. Drovandi C.C. Principles of Experimental Design for Big Data Analysis / C.C. Drovandi, C. Holmes, J.M. McGree, K. Mengersen, S. Richardson, E.G. Ryan // Stat. Sci. – 2017. – 32(3). – P. 385–404.
7. Herzberg A.M. The design of experiments for model selection: minimization of the expected mean-squared error / A.M. Herzberg, A.V. Tsukanov // Utilitas mathematica. – 1995. – vol.47. – P. 85-96.
8. Satterthwaite F.E. Random Balance Experimentation / F.E. Satterthwaite // Technometrics. – 1959. – V.1.N2. – P. 111-137.
9. Tsukanov A.V. Integrated statistical and information models of systems with databases / A.V. Tsukanov // Advances in modeling & analysis. – 1995. – Ser.B. V.34. N2. – P. 27-34.
10. PIX Robotics.- [Elektron. resurs].-Rezhim dostupa: <https://pix.ru/company>.

*Цуканов Александр Викторович, д.т.н., профессор,
tsukanov2@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

*APPLICATION OF RPA TECHNOLOGY FOR ANALYSIS OF THE
TECHNOLOGICAL EQUIPMENT MARKET*

A.V. Tsukanov

The possibilities of using the technology Robotic Process Automation for searching and analyzing information in large databases on the Internet about the state of the technological equipment market are considered. The analysis of the structure of the received information is given. It is proposed to use the method of screening experiment to select significant factors affecting the response function. In particular, statistical modeling of the cost of processing centers from a variety of possible parameters is considered.

Keywords: technological equipment, large databases, automation of business processes, statistical modeling, screening experiments.

Tsukanov Alexander Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, tsukanov2@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Копп В.Я.¹, Заморёнов М.В.², Чаленков Н.И.³

Аннотация. В статье производится оптимизация параметров системы, состоящей из трёх последовательно соединённых производственных элементов. При оптимизации параметров используется закон падающей отдачи. Приводятся параметры отклика каждого из элементов и результаты оптимизации вложений средств в повышении коэффициента готовности.

Ключевые слова. Оптимизация, закон падающей отдачи, производственный элемент, последовательное соединение.

При проектировании новых и модернизации действующих систем возникает задача обеспечения ее максимальной производительности при ограничении средств, вкладываемых в производственные элементы (ПЭ). Предполагаем, что реакции $\varphi(x_i)$ единиц оборудования, которыми являются ПЭ, на дополнительные капиталовложения x_i известны.

В статье рассматривается оптимизация параметров системы [1-4], состоящей из последовательного соединения трёх производственных элементов.

При этом зависимость среднего времени безотказной работы $m_{ot_i}(x_i)$ каждой ПЭ _{i} , ($i = \overline{1, n}$) от величины вкладываемых средств x_i , может быть записана в виде:

$$m_{ot_i}(x_i) = \phi(x_i), \quad (i = \overline{1, n}), \quad (1)$$

где $m_{ot_i}(x_i)$ – МО времени безотказной работы ПЭ _{i} .

Функции $\phi(x_i)$ должны иметь вид, соответствующий закону падающей отдачи (**Рис.1**).

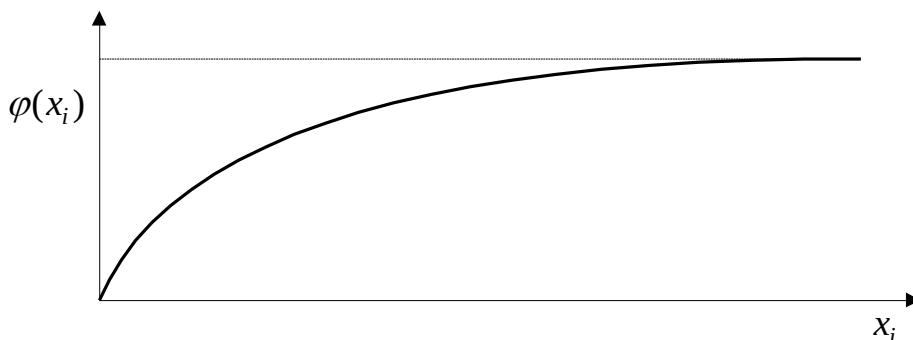


Рис.1 – Функция, соответствующая закону падающей отдачи

Указанному на **Рис.1** графику могут соответствовать различные функции. В данной работе использовалась экспоненциальная функция вида:

$$\phi(x_i) = A_i - B_i e^{-\lambda_i x_i}, \quad (2)$$

где A_i , B_i , λ_i – постоянные коэффициенты. Отметим, что при $x_i = 0$ $m_{ot_i}(0) = A_i - B_i$.

Экспоненциальная функция выбрана в качестве аппроксимирующей, т.к. является монотонной, стремящейся к определенному пределу, что соответствует реальному объекту.

В качестве аппроксимирующего закона распределения СВ α_i принимался обобщенный закон Эрланга второго порядка. Для определения его параметров использован метод моментов, причем дисперсии определялись как минимально возможные при заданных МО и ограничении

$$\frac{[m_{\alpha_i}(x_i)]^2}{2} < D_{\alpha_i}(x_i) < m_{\alpha_i}(x_i). \quad (3)$$

На основании сказанного выше с учетом выражений (1–3) математическая постановка задачи имеет вид.

Найти

$$\max_x \rightarrow \{m_{ot_i}(x_i) = A_i - B_i e^{-\lambda_i x_i}, (i = \overline{1, n})\}, \quad (4)$$

при ограничении S на сумму распределяемых средств

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq S, \quad (5)$$

и на величину средств, вкладываемых в каждую ТЯ

$$0 \leq x_i \leq S, (i = \overline{1, n}), \quad (6)$$

с учетом условия (3).

Данная задача относится к нелинейному выпуклому программированию, так как каждая из $m_{ot_i}(x_i)$, ($i=\overline{1,n}$) является монотонно возрастающей нелинейной функцией. Поэтому для поиска экстремума целевой функции целесообразно воспользоваться одним из прямых методов многомерного поиска.

Для удобства переведем одну любую из переменных x_i , ($i=\overline{1,n}$) в разряд зависимых и выразим ее через остальные $n-1$ независимых переменных с помощью условия (5). Например, полагается, для переменной x_n :

$$x_n \leq S - \sum_{i=1}^{n-1} x_i. \quad (7)$$

Учитывая монотонность целевой функции, можно в условии (5) перейти к равенству

$$\sum_{i=1}^n x_i = S, \quad (8)$$

и на основе (8) записать (7) в виде:

$$x_n = S - \sum_{i=1}^{n-1} x_i. \quad (9)$$

Если учет условий (5) организовать в виде их проверки на каждом шаге, то фактически можно утверждать, что осуществлен переход от условной к безусловной оптимизации.

Процедура поиска оптимума состоит из ряда последовательных циклически повторяющихся шагов.

1. Задаются начальные суммы, например нулевые, вкладываемых средств в ПЭ $x_{i,0}$, ($i=\overline{1,n-1}$) и вычисляется производительность САЛ при значении вектора $X = (x_{1,0}, \dots, x_{i,0}, \dots, x_{n-1,0})$ независимых переменных.

2. На k -м шаге процесса осуществляется приближения к оптимуму:

2.1. Для каждой i -ой переменной ($i=\overline{1,n-1}$) рассчитывается составляющая вектора градиента с некоторым приращением Δx_i .

2.2. Определяются направляющие косинусы на k -ом шаге.

2.3. Вычисляются значения переменных $x_{i,k}$ в соответствии с соотношением:

$$x_{i,k} = x_{i,k-1} + V_{i,k} \cdot h,$$

где h – величина приращения модуля вектора X на каждом шаге процесса оптимизации.

2.4. Производится проверка условия (6) для каждой переменной.

2.5. Определяется коэффициент готовности системы при значении вектора $X = (x_{1,k}, \dots, x_{i,k}, \dots, x_{n-1,k})$ и зависимой переменной $x_{n,k}$.

3. Пошаговая процедура продолжается до тех пор, пока не будет достигнут максимум коэффициента готовности системы.

Ниже приведен пример оптимального распределения ресурсов.

Имеется последовательное соединение трёх производственных элементов [5]. Известны функции откликов на вложение средств для каждого из ПЭ:

$$m_{ot_i}(x_i) = A_i - B_i e^{-\lambda_i x_i},$$

где значения A_i , B_i , λ_i приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры функций откликов

$ПЭ_i$	A_i	B_i	λ_i
$i = 1$	60	21,16	0,5
$i = 2$	60	21,16	0,01
$i = 3$	60	21,16	0,035

Без вложений средств коэффициент готовности системы равен 0.587. Результаты оптимизации приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты оптимизации вложений средств в повышении коэффициента готовности

Сумма вложений, тыс. руб.	Оптимальное распределение средств			Оптимальный коэффициент готовности
	1-й ПЭ	2-й ПЭ	3-й ПЭ	
10	2	5	3	0.778
50	20	13	17	0.802
100	20	51	29	0.819
200	30	79	91	0.830
300	50	100	150	0.837
400	100	125	175	0.841

Из таблицы 2 видно, что при росте вкладываемых средств, коэффициент готовности имеет незначительные изменения, что соответствует закону падающей отдачи. При этом оптимальным вложением средств в систему является 200 тыс. руб. при котором коэффициент готовности системы составляет 0.83.

Библиографический список

1. Гончаров В.А. Методы оптимизации : учеб. пособие для студентов вузов / В.А. Гончаров. – Москва : Юрайт: Высшее образование, 2010. – 188 с.
2. Моисеев Н. Н. Методы оптимизации / Н. Н. Моисеев, Ю.П. Иванилов, Е.П. Столярова. – Москва : Наука, 1980. – 352 с.
3. Ногин В.Д. Основы теории оптимизации / В.Д. Ногин, И.О. Протодьяконов, И.И. Евлампиев.— Москва : Высшая школа, 2000. – 384 с.
4. Струченков В. И. Методы оптимизации. Основы теории, задачи, обучающие компьютерные программы / В.И. Струченков.— Москва : Экзамен, 2010. – 314 с.
5. Копп В. Я. Фазовое укрупнение полумарковской системы, состоящей из двух последовательно соединенных технологических ячеек / В.Я. Копп, М.В. Заморёнов, Н.И. Чаленков // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – 2022. – №.3(19). – С. 56–66.

Bibliograficheskiy spisok

1. Goncharov V.A. Metody optimizacii : ucheb. posobie dlya studentov vuzov / V.A. Goncharov. – Moskva : YUrajt: Vysshee obrazovanie, 2010. – 188 s.
2. Moiseev N. N. Metody optimizacii / N. N. Moiseev, YU.P. Ivanilov, E.P. Stolyarova. – Moskva : Nauka, 1980. – 352 s.
3. Nogin V.D. Osnovy teorii optimizacii / V.D. Nogin, I.O. Protod'yakonov, I.I. Evlampiev.— Moskva : Vysshaya shkola, 2000. – 384 s.
4. Struchenkov V. I. Metody optimizacii. Osnovy teorii, zadachi, obuchayushchie komp'yuternye programmy / V.I. Struchenkov.— Moskva : Ekzamen, 2010. – 314 s.
5. Kopp V. YA. Fazovoe ukрупnenie polumarkovskoj sistemy, sostoyashchej iz dvuh posledovatel'no soedinennyh tekhnologicheskikh yacheek / V.YA. Kopp, M.V. Zamoryonov, N.I. CHalencov // Avtomatizaciya i izmereniya v mashinopriborostroenii. – 2022. – №.3(19). – S. 56–66.

¹*Копп Вадим Яковлевич, д.т.н., профессор, v_kopp@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Заморёнов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент, Zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³*Чаленков Никита Игоревич, ассистент, chalenkov-nikita@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A SYSTEM CONSISTING OF A SERIAL CONNECTION OF THREE PRODUCTION ELEMENTS

V.Ya. Kopp, M.V. Zamoryonov, N.I. Chalenkov

The article optimizes the parameters of a system consisting of three serially connected production elements. When optimizing the parameters, the law of decreasing returns is used. The article presents the response parameters of each of the elements and the results of optimizing investments in increasing the availability factor.

Keywords: optimization, the law of decreasing returns, production element, serial connection.

Kopp Vadim Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, v_kopp@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

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

Chalenkov Nikita Igorevich, assistant, chalenkov-nikita@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

УДК 621.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАСЫЩЕНИЯ ГАЗОМ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ АППАРАТА ЖИДКОСТНОГО ДЫХАНИЯ

Поливцев В.П.¹, Поливцев В.В.², Балакин А.И.³

Аннотация. Представлены результаты исследований технологии жидкостного дыхания для процесса насыщения газом жидкости. Разработаны конструкции медицинских аппаратов жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром, в основе которого используется схема ультразвукового удаления газов и две схемы оксигенации (насыщения) дыхательной жидкости – одна барботированием, а другая – смешанная с барботированием и струйным насосом. Разработана инженерная методика определения скорости насыщения жидкости газом для схем с барботированием. Получены эмпирические зависимости коэффициента, определяющего скорость насыщения кислородом и концентрации кислорода в жидкости. Приведены графики, подтверждающие возможность использования полученных эмпирических зависимостей.

Ключевые слова. Избыточное давление, жидкостное дыхание, ультразвук, дыхательная жидкость, замкнутый дыхательный контур.

Введение.

Жидкостное дыхание (ЖД) представляет собой физиологический процесс, обеспечивающий нормальное течение метаболизма живых организмов и позволяет получать кислород не из воздуха, а из специально разработанных жидкостей. В процессе дыхания биологические объекты поглощают кислород, а выделяют некоторую часть продуктов метаболизма, таких, как углекислый газ, азот и кислород.

Спонтанное дыхание человека и иных биологических объектов – представляет собой процесс, регулируемый сложными физиологическими механизмами, осуществляющийся за счет ритмичных периодических движений грудной клетки, диафрагмы и брюшного пресса, приводящих к последовательному расправлению и сокращению легких. Во время вдоха в альвеолах создается отрицательное давление, а во время выдоха – положительное. Отрицательное давление в грудной клетке (вдох) способствует притоку венозной оксигенированной крови к сердцу, а положительное (выдох) – выбрасыванию крови (эффект «грудной помпы»).

Первые эксперименты по жидкостному дыханию с перфторуглеродом (ПФУ) на животных были проведены с использованием резервуаров,

расположенных выше животного, из которых жидкость подавалась в их легкие под действием силы тяжести, а затем перетекала в резервуар, находящийся ниже животного [1 - 5]. Однако в более поздних экспериментах уже использовался метод принудительной циркуляции жидкости, требовавший дополнительного оборудования [6].

Первые исследования по ЖД у людей были предприняты в качестве попыток лечения тяжелобольных младенцев. В 1991 году Б. Фурман (В.Р. Fuhrman) с коллегами впервые описали метод, который ими был назван ПФУ-ассоциированным газообменом (PFC-associated gas exchange). В настоящее время эту технологию называют частичной жидкостной вентиляцией [7].

Для технологии жидкостного дыхания используют как технологию частичной жидкостной вентиляции (ЧЖВ), так и технологию тотальной жидкостной вентиляции (ТЖВ) легких.

В общем случае сущность частичная жидкостная вентиляция состоит в том, что во время газовой искусственной вентиляции легких, легкие медленно заполняются жидким ПФУ, которая оксигенируются, а углекислый газ удаляется вместе с дыхательными газами, циркулирующими в легких под действием аппарата искусственной вентиляции лёгких. Установлено, что потенциально ЧЖВ может использоваться при лечении устойчивой легочной гипертензия, диафрагмальной грыжи, пневмонии, как транспортное средство для доставки лекарственных средств и т.д. [8–12].

Более перспективными могут оказаться технологии ЖД, основанные на ТЖВ. При ТЖВ лёгкие полностью заполняются жидким ПФУ. ТЖВ предполагает использование специальных аппаратов, называемых вентиляторами (аппаратами жидкостного дыхания), для доставки и выведения относительно плотных, вязких ПФУ, а также для экстракорпоральной оксигенации и удаления диоксида углерода из жидкости.

Оптимальная вентиляция и оксигенация легких при ТВЖ зависит от минутного объема вентиляции в сочетании с достаточным временем на диффузию дыхательных газов в жидкий ПФУ и из него. В фазе поддержания ТЖВ обычно устанавливается низкая частота дыхания от 4 до 8 вдохов в минуту, с соотношением длительности вдоха к выдоху от 1:2 до 1:3. При такой частоте дыхания и временных соотношениях, жидкий ПФУ находится в легких достаточно долго для диффузии дыхательных газов и достижения эффективного легочного газообмена.

Известно множество конструкций аппаратов для ТЖВ, отличающихся друг от друга определенными характеристиками [13 - 17].

Аппараты жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром представлены в работах [18–24].

Основная часть.

Для различных медицинских задач лечения больных с заболеванием легких авторами спроектированы, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы аппаратов жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром (циклом), в основе которого используется схема ультразвукового удаления газов и две схемы оксигенации (насыщения) дыхательной жидкости: одна барботированием (**Рис.1**), а другая смешанная (**Рис.2**) с барботированием и струйным насосом.

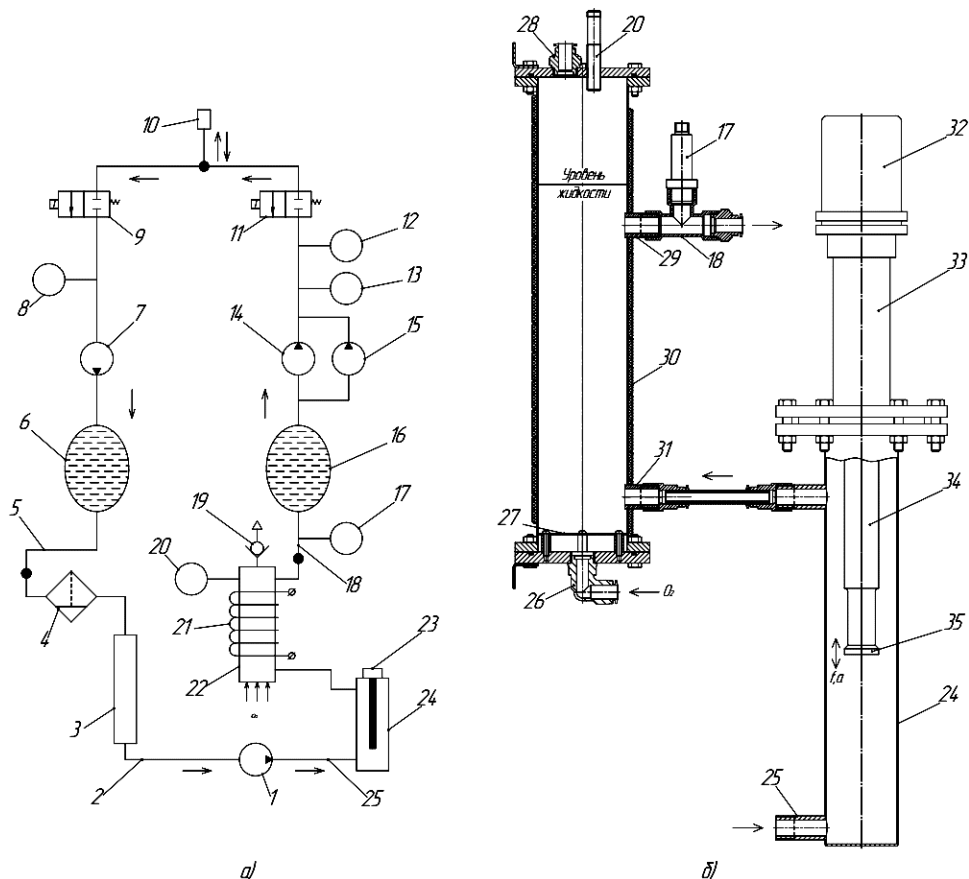


Рис.1 – Принципиальная схема аппарата (а) и конструкция камеры ультразвуковой обработки и оксигенатора (б)

В аппарате жидкостного дыхания замкнутый дыхательный контур содержит перекачивающий насос 1 (**Рис.1а**), вход которого соединен, посредством трубопровода 2 с последовательно встроенными в него обеззараживающей камерой 3 (например, ультрафиолетовой) и фильтром 4, соединен с трубопроводом 5 контура выдоха с последовательно встроенными в него накопительной эластичной емкостью 6 в виде упругой оболочки для использованной (выдыхаемой) жидкости, откачивающим из легких насосом 7, датчиком расхода 8 и отсечным электромагнитным клапаном 9. Выход перекачивающего насоса, соединен посредством трубопровода 25 с

последовательно встроенными в него вертикально расположенной цилиндрической герметичной проточной камеры 24 для ультразвукового удаления газов (выдыхаемого углекислого газа) из жидкости, снабженной источником ультразвукового воздействия 23 в виде генератора электрических ультразвуковых колебаний 32 (**Рис.16**) и акустически связанных преобразователя электрических колебаний в механические 33 (например, пьезоэлектрического), ступенчатого концентратора колебаний 34 и рабочего инструмента (излучателя) в форме диска 35, и далее оксигенатором 22, охваченным снаружи спиральным нагревательным элементом термостата 21, соединен с трубопроводом 18 контура вдоха с последовательно встроенными в него датчиком температуры 17, накопительной эластичной емкостью 16 для насыщенной кислородом (вдыхаемой) жидкости, аналогичной емкости для выдыхаемой жидкости, и двумя параллельно установленными на вдох закачивающими насосами 14, 15, датчиком расхода 13, датчиком давления 12 и отсечным электромагнитным клапаном 11.

Выход и вход трубопроводов соответственно контуров вдоха и выдоха соединены между собой и с переходником 10 для установки эндотрахеальной трубки, а упомянутый выше оксигенатор выполнен в виде цилиндрической герметичной вертикально расположенной камеры 30 с патрубками 31 и 26 для подвода соответственно дыхательной жидкости и кислорода, и распылителем кислорода в виде перфорированной мембраны 27 в ее нижней части, а также патрубком 29 отвода жидкости, ультразвуковым датчиком уровня 20 и патрубком 28 для установки обратного (предохранительного) клапана 19 (**Рис.1а**) в ее верхней части.

Схема аппарата жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром представленная на **Рис.2** отличается от схемы, представленной на **Рис.1**, только наличием другой конструкции оксигенатора. От насоса 1 через магистраль 48 дыхательная жидкость поступает в корпус 45 аппарата ультразвукового удаления газов 44, 46, 47 и через тройник поступает в оксигенатор. Камера оксигенатора (**Рис.2**), выполнена в виде цилиндрической герметичной вертикально расположенной емкости с патрубком 40 для подвода дыхательной жидкости в оксигенатор его нижней части, диском 24, а также с патрубком 19 отвода жидкости, ультразвуковым датчиком уровня 21 и патрубком для установки обратного (предохранительного) клапана 22 в ее верхней части, нагревателя 23.

Оксигенатор для насыщения дыхательной жидкости кислородом выполнен комбинированным в виде схемы с барботированием и схемы с диспергированием струи кислорода через струйный насос установленный в диске 24 (**Рис.2б**), являющегося дном камеры оксигенатора, снабженного центральным отверстием 49, в котором закреплен конец большего диаметра

конического диффузора 25 эжектора (струйный насос на базе трубки Вентури) с выходным отверстием, в котором установлен разделитель потока дыхательной жидкости в виде конической вставки 37 со спиральными канавками 36 на ее прилегающей к диффузору конической поверхности.

Соосно диффузору расположена смесительная камера 26 эжектора в виде усеченного конуса, полость которой обращена меньшим диаметром к входному отверстию полости диффузора, а большим диаметром к всасывающей полости 35 корпуса эжектора 27, в которой соосно полости смесительной камеры расположено питающее сопло 34 эжектора.

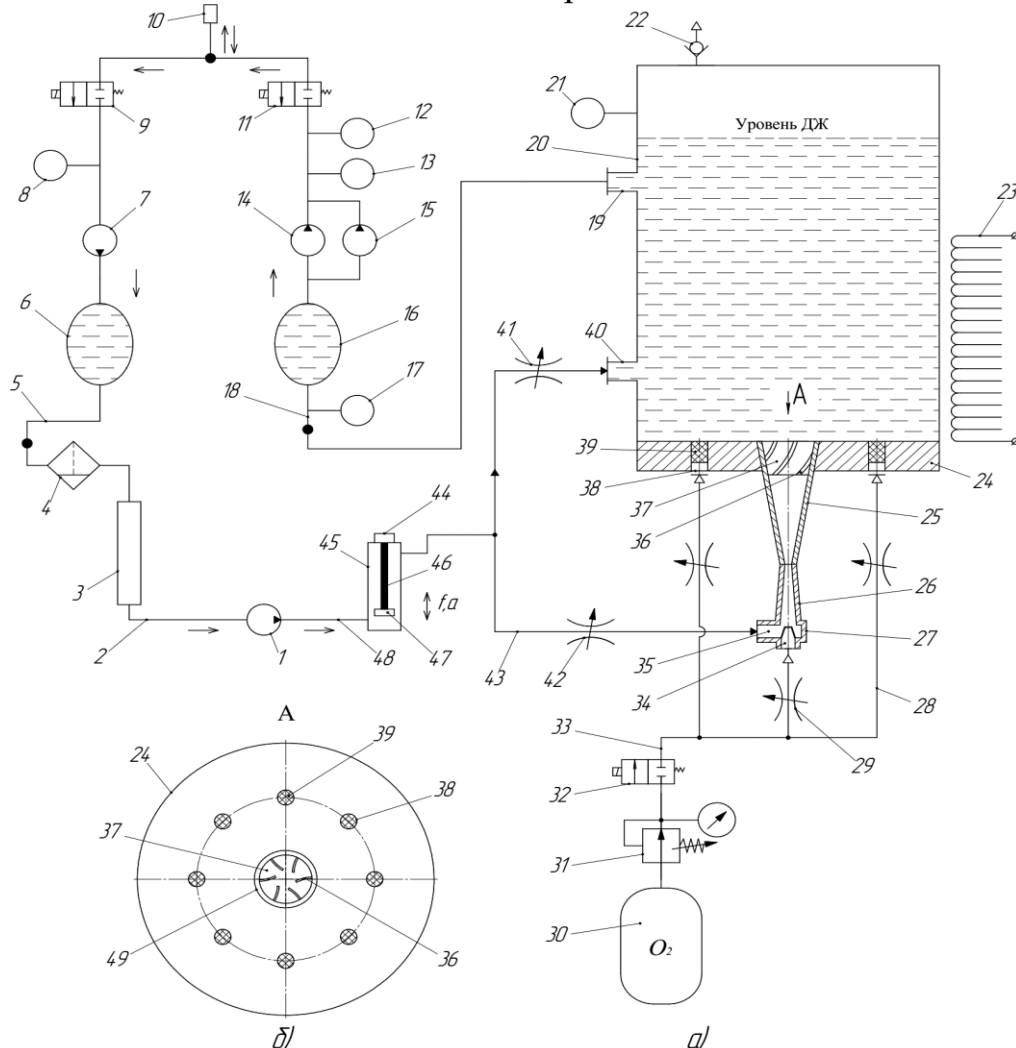


Рис.2 – Принципиальная схема аппарата (а) и конструкция с струйным насосом (б)

Диффузор и смесительная камера образуют трубку Вентури. По периферии диска 24 выполнены на одинаковом расстоянии от центра и с одинаковым окружным шагом сквозные отверстия 38 со вставками 39 из

пористого материала (например, спеченного полимера или керамики) для распыления струй кислорода барботированием. Питающее сопло эжектора и отверстия на периферии диска соединены посредством трубопроводов 28 со встроенными в них регулируемыми дросселями 29 и трубопровода 33 со встроенными в него отсечным электромагнитным клапаном 32 и регулятором давления 31 с баллоном сжатого кислорода 30, а всасывающая полость эжектора соединена трубопроводом 43 со встроенным в него регулируемым дросселем 42 с трубопроводом для подвода дыхательной жидкости в полость камеры оксигенатора. На магистрали подачи жидкости из ультразвукового аппарата удаления газов в оксигенатор установлены дроссели 41 и 42.

Аппараты жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром схемы, которых представлены на **Рис.1, 2** отличаются только оксигенатором. Принцип работы указанных выше аппаратов идентичный и заключается в следующем: перед ее началом все полости контуров заполняются подготовленной дыхательной жидкостью, например, перфторуглеродом, а в переходник 10 (**Рис.2а**) устанавливается эндотрахеальная трубка. С помощью регулятора давления 31 устанавливается давление кислорода, подаваемого в оксигенатор, превышающее давление дыхательной жидкости аппарата.

Цикл работы аппарата состоит из двух фаз – фазы вдоха, продолжительностью 2...3 секунды, и фазы выдоха, продолжительностью 4...6 секунд. Необходимое время длительности каждой из фаз устанавливается с помощью пульта блока управления (на схеме не показан). Затем в трахею пациента вводится эндотрахеальная трубка.

Фаза вдоха реализуется при закрытом отсечном клапане 9 и выключенном насосе 7 контура выдоха, открытом отсечном клапане 11 контура вдоха и открытом отсечном клапане 32 в составе дозатора кислорода. Включается основной закачивающий насос 14 и дыхательная жидкость, находящаяся в полости накопительной эластичной емкости 16, поступает по трубопроводу 18 контура вдоха к эндотрахеальной трубке. Поскольку продолжительность фазы вдоха в два раза меньше продолжительности фазы выдоха, а производительность насосов 7, 14 и 15 одинаковая, использование в контуре вдоха двух закачивающих насосов 14 и 15 обеспечивает равенство объемов жидкости, перекачиваемой через контуры.

Фаза выдоха реализуется при закрытом отсечном клапане 11, выключенных насосах 14 и 15, открытом отсечном клапане 9 и включенном откачивающим насосе 7, обеспечивающих поступление выдыхаемой жидкости в накопительную емкость 6. Одновременно с насосом 7 включается перекачивающий насос 1 контура подготовки дыхательной жидкости, который осуществляет перекачку поступающей в емкость 6 выдыхаемой жидкости в емкость 16 контура вдоха через очистной фильтр 4, обеззараживающую камеру

3, камеру 45 ультразвуковой проточной обработки жидкости и камеру 20 оксигенатора.

При реализации фаз вдоха и выдоха перекачивающий насос 1 включен постоянно.

Входящий в состав проточной камеры 45 источник ультразвукового воздействия 44, создает с помощью генератора ультразвуковые электрические колебания, которые преобразуются в механические ультразвуковые колебания с помощью преобразователя, усиливаются с помощью ступенчатого концентратора 46 продольных колебаний и вызывают колебания с определенной частотой и амплитудой рабочего инструмента в виде диска 47, закрепленного на конце концентратора.

Ультразвуковые колебания диска 47 вызывают кавитацию соприкасающейся с ним жидкости, которая приводит к образованию пузырьков из растворенных в ней газов азота, углекислого газа и кислорода. Эти пузырьки выносятся потоком жидкости из полости проточной камеры 45 в полость камеры 20 оксигенатора, где подхватываются пузырьками кислорода, поступающего из периферийных отверстий дозатора 38 со вставками 39 из пористого материала, а также из спиральных канавок 36 вставки 37, и выносятся в часть полости камеры 20, расположенную выше уровня находящейся в ней жидкости, который всегда выше отверстия отводящего патрубка 19. При этом часть пузырьков кислорода растворяется в дыхательной жидкости, осуществляя ее насыщение кислородом, т.е. оксигенацию.

Повышению надежности насыщения способствует перемешивание дыхательной жидкости с поступающим в нее из дозатора кислородом, осуществляемое с помощью входящего в состав дозатора инжектора.

Струя сжатого кислорода, пройдя через сужение в питающем сопле 34 и всасывающую полость 35 в корпусе 27 инжектора, поступает в смесительную камеру 26. При этом, за счет кинетической энергии струи, в полости 35 создается разрежение, вызывающее подсос дыхательной жидкости из трубопровода 43 в указанную полость, откуда она вместе со струей сжатого кислорода поступает в смесительную камеру 26. Далее, образовавшийся поток дыхательной жидкости, пройдя сужение в месте соединения смесительной камеры 26 с диффузором 25, увеличивает свою скорость за счет эффекта Вентури, а проходя в полость камеры 20 оксигенатора через спиральные винтовые канавки (каналы) 36 вставки 37, разделяется на ряд более мелких потоков по числу канавок, перемещающихся в полости камеры оксигенатора по траекториям в виде расходящихся винтовых спиралей, осуществляющих перемешивание находящейся в камере дыхательной жидкости с дозируемым кислородом, способствуя тем самым повышению надежности насыщения этой жидкости кислородом.

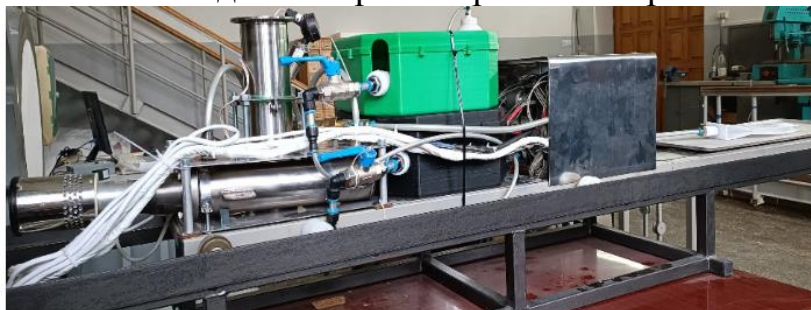
Уровень жидкости в оксигенаторе контролируется ультразвуковым бесконтактным датчиком 21, который по каналу обратной связи через блок управления изменяет работу насоса 1, увеличивая или уменьшая расход жидкости, а накапливающаяся в верхней части полости камеры 20 оксигенатора смесь газов азота, углекислого газа и частично кислорода, при превышении давления срабатывания обратного клапана 22, удаляется через него в окружающую среду.

Обогащенная кислородом жидкость поступает в емкость 16 по трубопроводу 18 со встроенным датчиком температуры 17, который через блок управления управляет термостатом 23, поддерживая заданную температуру жидкости, проходящей через оксигенатор.

Датчик давления 12 в контуре вдоха обеспечивает через блок управления регулирование по давлению насосов 14 и 15, а датчик расхода 13 – их регулирование по расходу.

Датчик расхода 8 в контуре выдоха контролирует работу откачивающего насоса 7. Выполнение емкостей 6 и 16 эластичными в виде упругих оболочек позволяет компенсировать возникающую при работе аппарата разность объемов жидкости, протекающей через контуры вдоха и выдоха.

С помощью регулируемых дросселей 29, 41 и 42 изменяется расход кислорода и дыхательной жидкости при настройке аппарата.



а)



б)

Рис.3 – Общий вид экспериментального стенда аппарата жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром: а) вид аппарата сбоку, б) вид аппарата на фоне барокамеры.

При изменении цикличности работы отсечного клапана 32, т.е. при изменении частоты его переключения, достигается порционность подачи кислорода в оксигенатор, что позволяет регулировать время насыщения кислородом протекающей через полость камеры жидкости и избежать ее перенасыщения кислородом.

Схема оксигенатора представленная на **Рис.2** имеет большую скорость насыщения дыхательной жидкости кислородом чем схема оксигенатора представленная на **Рис.1**, за счет применения струйного насоса при распылении кислорода в жидкости. Общий вид экспериментального стенда аппарата жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром представлен на (**Рис.3**).

Задачи исследований.

1. Разработать теоретическое обоснование скорости насыщения газом (кислородом) жидкости (перфтордекалина) в зависимости от таких основных параметров, как расход жидкости и газа, объем жидкости в схемах, используемых оксигенаторах представленных на **Рис.1,2**.
2. Провести экспериментальные исследования скорости насыщения газом (кислородом) жидкости (перфтордекалина) и сравнить их с теоретическими зависимостями.
3. Проверить эффективность конструктивных схем насыщения представленных на **Рис.1-3**.

Рассмотрим теоретические аспекты растворения газов в жидкости в том числе и для предложенных выше схем оксигенаторов.

Насыщение дыхательной жидкости кислородом (воздухом) является важным процессом для восполнения кислорода после ее прохождения например – через легкие биообъекта. Переход кислорода в дыхательную жидкость в проточной камере оксигенатора можно рассматривать как поэтапный процесс (**Рис.4**): переход на границу раздела газ – жидкость, переход через границу газ – жидкость и переход газа с поверхности раздела в жидкость. На первом этапе газообмен происходит за счет процессов: если диффузии - то медленно, а при конвекции сравнительно быстро. Переход через пограничный слой часто относят к процессам, происходящим в поверхностной очень тонкой пленке жидкости. Если процесс протекает чисто диффузионный, то он проходит очень медленно. Третий этап – это процесс переноса газа в жидкость.

Различные технические решения, которые представлены в схемах оксигенаторов на **Рис.1-3** позволяют на всех трех этапах осуществлять более быстрый процесс конвекции.

Можно выделить три основные схемы насыщения жидкости газом:

– барботированием (смешивание жидкости и газа через поступающую в

жидкость струю газа);

- распылением (жидкости до мельчайших частиц в среде газа);
- комбинированный.

На **Рис.4а)** представлена проточная для жидкости камера с верхней подачей газа и разделением сред по границе с площадью A , а на **Рис.4б)** представлена проточная для жидкости камера с барботированием и диспергированием (рассеиванием) струи газа.

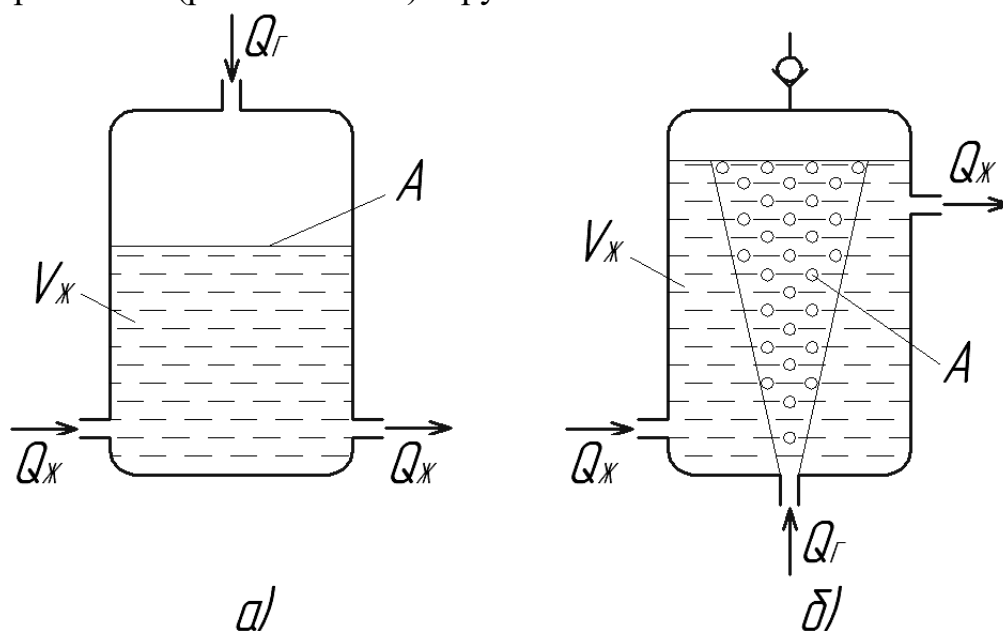


Рис.4 – физическая модель растворения газов в жидкости: а) с верхней подачи газа, б) барботированием газа в жидкость проточной камеры.

Процесс растворения газа (скорость изменения концентрации например - кислорода) в дыхательную жидкость (**Рис.4а)** зависит от площади поверхности разделяющей среду газ - жидкость, а также от градиента концентрации газа, и объема жидкости и его можно описать зависимостью [25]:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \left(\frac{A}{V_{ж}} \right) (C_s - C). \quad (1)$$

где $\frac{dC}{dt}$ – скорость изменения концентрации газа в жидкости во времени, мг/(л мин.); K_L – коэффициент переноса газа см/мин; A – площадь контакта газа и жидкости, см²; $V_{ж}$ – объем жидкости, см³; C_s – возможная (максимальная) концентрация насыщения газом жидкости, мг/л; C – концентрация газа в жидкости в любой момент времени, мг/л.

Величина $(C_s - C)$ в уравнении (1) – разность между возможной (максимальной) концентрацией газа в жидкости и концентрацией газа в

жидкости в любой момент времени. Максимальная концентрация газа при насыщении C_S зависит от парциального давления газа (при многокомпонентном газе), температуры и давлении жидкости и определяется по закону Генри-Дальтона

$$C_S = K_H P_{II},$$

где K_H – коэффициент Генри; P_{II} – парциальное давление газа над раствором.

Для увеличения скорости растворения газа в жидкости применяют различные способы и конструкции аппаратов для растворения газов, которые позволяют насыщать и перенасыщать жидкость за счет конвенции (быстрый процесс) и увеличения площади контакта газа с жидкостью.

$$\frac{dC}{dt} = K_{LM} (C_S - C). \quad (2)$$

В таких случаях в уравнении (2) объединяют общий коэффициент перехода газа K_{LM} с коэффициентом K_L и отношением $\left(\frac{A}{V_{жс}}\right)$ и другими конструктивными параметрами аппаратов насыщения жидкости газом.

Интегрируя уравнение (1) и (2) для граничных условий от C_H до C и от $t = 0$ до t , получаем следующие уравнения:

$$\ln \left(\frac{C_S - C_H}{C_S - C} \right) = K_L \left(\frac{A}{V_{жс}} \right) t, \quad (3)$$

$$\ln \left(\frac{C_S - C_H}{C_S - C} \right) = K_{LM} t. \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) разность $(C_S - C_H)$ можно рассматривать как величину начального насыщения газом жидкости $t_H = 0$, а $(C_S - C)$ – как величину концентрации газа спустя время $t_k = t$.

Для конкретной конструкции аппарата насыщения газом жидкости, измеряя изменение концентрации газа можно найти зависимость коэффициента переноса газа в жидкость K_L или K_{LM} используя уравнения (3) и (4).

Уравнения (1) справедливо для замкнутого объема $V_{жс}$ и площади контакта жидкости и газа A . Для получения зависимости изменения концентрации в проточной камере, где растворение газа происходит с объемным расходом жидкости $Q_{жс}$ подставим в выражение (3) время насыщения жидкости газом $t = \frac{V_{жс}}{Q_{жс}}$, выраженное через объем камеры насыщения и объемный расход жидкости, проходящей через камеру. В

результате получаем выражение:

$$\ln\left(\frac{C_S - C_H}{C_S - C}\right) = K_L \left(\frac{A}{Q_{жс}}\right) \quad (5)$$

В выражении (5) площадь активной поверхности газа, распыляемого и растворяемого в жидкости (**Рис.4,б**)), зависит от конкретного способа распыления, конструкции распылителя газа и от величины и количества получаемых в конечном итоге пузырьков газа.

Определим площадь растворяемых в жидкости пузырьков газа через объемный расход подаваемого за время t газа, объема и площади сферических пузырьков газа, получаем теоретическую площадь пузырьков газа в виде формулы:

$$A = \frac{3Q_z V_{жс}}{Q_{жс} R}, \quad (6)$$

где Q_z – объемный расход растворяемого в жидкости газа, R – радиус пузырьков газа.

Учитывая реальную площадь пузырьков газа, подставив в выражение (5) формулу (6) с коэффициентом K_z учитывающим реальную площадь пузырьков газа экспериментальным путем, в результате получаем выражение, для насыщения газом проточной камеры жидкости (**Рис.4б**):

$$\ln\left(\frac{C_S - C_H}{C_S - C}\right) = K_L K_z \left(\frac{3Q_z V_{жс}}{R Q_{жс}^2}\right) \quad (7)$$

где K_z – коэффициент реальной площади растворяемых в жидкости пузырьков газа.

С учетом закона Генри - Дальтона для возможной (максимальной) концентрации газа в жидкости $C_S = K_H P_{II}$ выражение (7) примет вид:

$$\ln\left(\frac{K_H P_{II} - C_H}{K_H P_{II} - C}\right) = K_L K_z \left(\frac{3Q_z V_{жс}}{R Q_{жс}^2}\right) \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определять скорость насыщения газом жидкости в проточной камере в зависимости от ее объема, объемного расхода газа и величины пузырьков газа для способа - барботирование с диспергированием (рассеиванием) струи газа представленным на (**Рис.4б**)).

Определим значение коэффициента K_{LM} используя выражение (4).

$$K_{LM} = \frac{\ln\left(\frac{C_S - C_H}{C_S - C}\right)}{t}.$$

Зная значения C_S , C_n , C можно определить коэффициент K_{LM} . С этой целью были проведены экспериментальные исследования зависимости концентрации кислорода в перфторуглеродной жидкости от времени при барботировании. В качестве нормируемого объема был взят объем жидкости один литр. Объемный расход кислорода менялся в пределах от 1 до 5 л/мин.

Рассмотрим объемный расход 1 л/мин. Значение концентрации кислорода получались с использованием прибора RDO Blue. Ввиду большого числа значений экспериментальные данные в статье не приводятся.

Время насыщения кислородом жидкости в данном случае принято 8 мин. Каждому моменту времени t соответствует значение C . Дискретность отсчета времени 1 с. Произведя аппроксимацию полученных экспериментальных данных, получили эмпирическую зависимость коэффициента переноса газа в жидкость K_{LMar} . При аппроксимации был использован полином десятой степени

$$\begin{aligned}
 K_{LMar} = & 0,0419370291505179 - 0,409334557128866 \cdot t + 0,836897984921998 \cdot t^2 - \\
 & - 0,544351723306908 \cdot t^3 + 0,253405674374646 \cdot t^4 - 0,130651659490915 \cdot t^5 + \\
 & + 0,0544162263373388 \cdot t^6 - 0,0138801230845294 \cdot t^7 + 0,00201349064342235 \cdot t^8 - \\
 & - 0,000153480928416446 \cdot t^9 + 0,00000478426575698642 \cdot t^{10}.
 \end{aligned} \quad (9)$$

Критерий R-квадрат для данного полинома составляет 0,972329, что является удовлетворительным. Полиномы меньших степеней показали не удовлетворительный результат. На **Рис.5** приведены зависимости изменения коэффициента K_{LM} полученные на основе экспериментальных данных и на основе аппроксимирующего полинома.

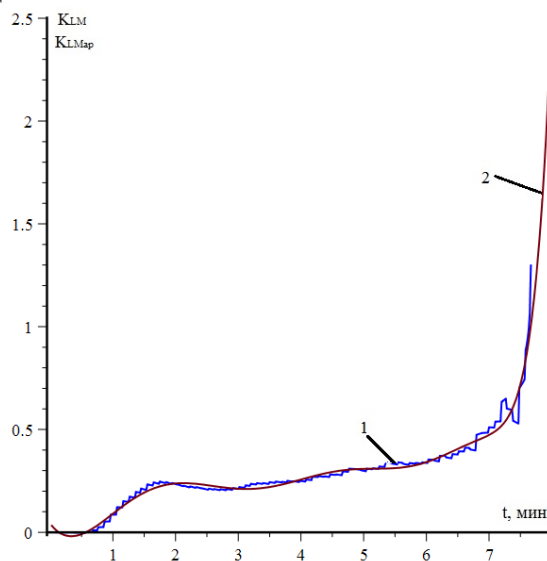


Рис.5 – Зависимость коэффициента K_{LM} от времени:
1 – экспериментальные данные; 2 – результат аппроксимации

На основе выражения (4) получим зависимость изменения концентрации кислорода в дыхательной жидкости от времени:

$$C = \frac{e^{K_{LM}t}C_S + C_H - C_S}{e^{K_{LM}t}}. \quad (10)$$

Построим графические зависимости полученные на основе экспериментальных данных и на основе выражения (10) (**Рис.6**).

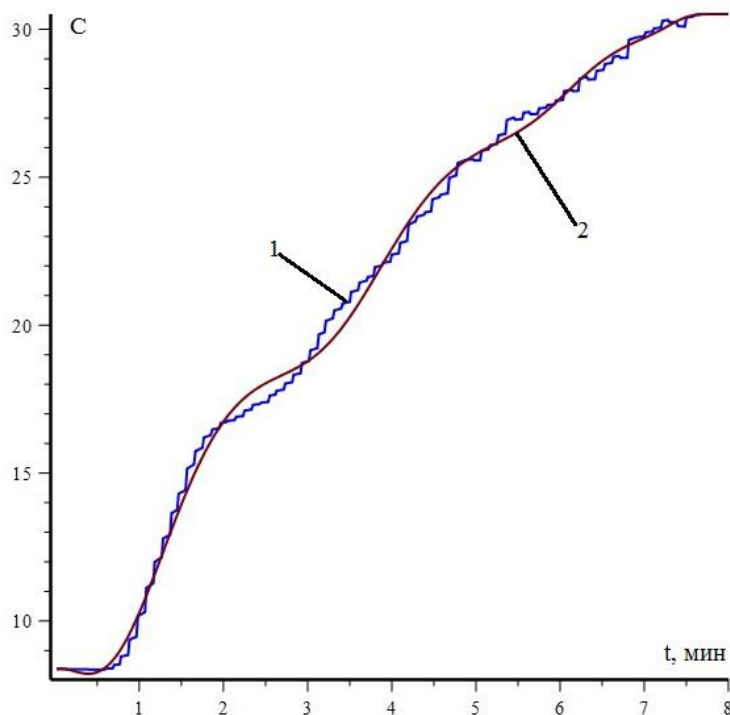


Рис.6 – Зависимость концентрации кислорода от времени:
1 – экспериментальные данные; 2 – аналитическая зависимость

Сравнение графических зависимостей показывает возможность использования выражения (10) для предварительного прогнозирования концентрации кислорода в дыхательной жидкости в зависимости от времени насыщения, с учетом значений коэффициента K_{LM} полученного из выражения (9).

Аналогичным образом были получены выражения для коэффициента K_{LM} при объемном расходе кислорода 3 и 5 л/мин.

Выводы

1. Теоретическая зависимость скорости растворения газа в жидкость определяется свойствами жидкости и газа, учитываемых коэффициентами K_L , K_H , расходом газа Q_2 , объемом камеры оксигенации $V_{ж}$, где протекает жидкость, и радиусом пузырьков газа R диспергированной струи газа, связанных с коэффициентом K_2 .

2. Поскольку выражение (8) представляет логарифмическую зависимость, то чем ближе концентрация газа C к полному насыщению C_s , тем больше времени требуется для растворения газа.

3. Полученная аналитическая зависимость (10) позволяет прогнозировать концентрацию кислорода в дыхательной жидкости в зависимости от времени насыщения. При этом выражение (9) для коэффициента K_{LM} получено путем аппроксимации экспериментальных данных в зависимости от объемного расхода газа Q_c .

Работа выполнена при поддержке программы Приоритет – 2030 Севастопольского государственного университета (стратегический проект №2 «Прорывные исследования и разработки в области жидкостного дыхания»)

Библиографический список

1. Kylstra, J.A. Of mice as fish / J.A. Kylstra, M.O. Tissing, A. van der Maen, R.P. de Graaf // Trans. of American Society for Artificial Internal Organs. – 1962. – Vol. 8, №1. – P. 378-383.
2. Clark, L.C. Survival of mammals breathing organic liquids equilibrated with oxygen at atmospheric pressure / L.C. Clark, F. Gollan // Science. – 1966. – Vol. 152. – P. 1755-1756.
3. Wolfson, M.R. Pulmonary applications of perfluorochemical liquids: ventilation and beyond / M.R. Wolfson, T.H. Shaffer//Paediatr Respir Rev. – 2005, Vol. 6, №2. – P. 117-27.
4. Kylstra, J.A. Feasibility of Liquid Breathing in Man/J.A. Kylstra//Office of Naval Research. Arlington, Virginia 22217, N00014-67-A-O25-007 report, date 2/28/77.
5. Kandler, M.A. Persistent Improvement of Gas Exchange and Lung Mechanics by Aerosolized Perfluorocarbon/M.A. Kandler, K. von der Hardt, E. Schoof, J. Dötsch, W. Rascher//American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 2001, Vol. 164, №1. – P. 31-35.
6. Gollan, F. Compliance and diffusion during respiration with fluorocarbon fluid/F. Gollan, J. McDermott, A.E. Johnson, R. Namon//Federation Proceedings. – 1970, Vol. 29, №5. – P. 1725-1730.
7. Koen, P. Fluorocarbon ventilation: maximum expiratory flows and CO₂ elimination/P. Koen, M.R. Wolfson, T.H. Shaffer//Pediatric Research. – 1988, Vol. 24. – P. 291-296.
8. Мороз, В.В. Жидкостная вентиляция легких, ее возможности и перспективы (современное состояние вопроса)/В.В. Мороз, А.В. Власенко, И.О. Закс//Анестезиология и реаниматология. – 2001, №6. – С. 66-73.
9. Мороз, В.В. Эндотрахеальное применение перфторана в условиях ИВЛ у

- больных с острым респираторным дистресс-синдромом/В.В. Мороз, Д.А. Остапченко, А.В. Власенко, П.Ю. Осипов, Л.В. Герасимов//Общая реаниматология. – 2005. – С. 5-11.
10. Попцов, В.Н. Первый клинический опыт использования частичной жидкостной вентиляции на основе эндобронхиального введения перфторана в комплексной терапии респираторного дистресс-синдрома/В.Н. Попцов, А.Е. Бalandюк//Биомедицинский журнал Medline.ru. – 2004, Т.5. – С. 173-174.
11. Sarkar, S. Liquid ventilation/S. Sarkar, A. Paswan, S. Prakas//Anesth Essays Res. – 2014, Vol.8, №3. – P. 277-282.
12. Cox, C.A. Liquid ventilation: a comprehensive overview/C.A. Cox, M.R. Wolfson, T.H. Shaffer//Neonatal Network. – 1996, Vol.15, №3. – P. 31-43.
13. Kirmse, M. Positive end-expiratory pressure improves gas exchange and pulmonary mechanics during partial liquid ventilation/M. Kirmse, Y. Fujino, D. Hess, R.M. Kacmarek//American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 1998, Vol. 158, №5 Pt 1. – P.1550-1556.
14. Kelly, K.P. Partial liquid ventilation - turning back a PAGE on evolution/K.P. Kelly//British Journal of Anaesthesia. – 1997, Vol. 78, №1. – P. 1-2.
15. Davies, M.W. Effect of the dose volume of perfluorocarbon when starting partial liquid ventilation/M.W. Davies, K.R. Dunster, K. Wilson, P.B. Colditz//Journal of Paediatrics and Child Health. – Vol. 46, №12. – P. 714-722.
16. Lemaire, F. Low-dose perfluorocarbon: a revival for partial liquid ventilation? /F. Lemaire//Critical Care Medicine. – 2007, Vol. 35, №2. – P. 662-663.
17. Kacmarek, R.M. Partial liquid ventilation in adult patients with acute respiratory distress syndrome/R.M. Kacmarek, H.P. Wiedemann, P.T. Lavin et al.//American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 2006, Vol. 173, №8 Pt 1. – P. 882-889.
18. Балакин А.И. Исследование модуля десатурации для аппарата жидкостной искусственной вентиляции легких / А.И. Балакин, В.В. Поливцев, В.А. Титков // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении, – 2022. – № 2(18). – С. 87-96.
19. Круговой А.Н. Разработка экспериментального образца индивидуального глубоководного аппарата / А.Н. Круговой, А.А. Четверкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - №2 (352). - 2022. - С. 168-172.
20. Поливцев В.П. Индивидуальный аппарат жидкостного дыхания с замкнутой циркуляцией дыхательной жидкости / В.П. Поливцев [и др.] // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. - 1 (17). -2022. - С. 88-95.
21. Поливцев В.П. Аппарат жидкостного дыхания со струйным

оксигенатором дыхательной жидкости / В.П. Поливцев, Е.В. Пашков, В.В. Поливцев // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. - 2 (18). - 2022 - С.41-51.

22. Четверкина А.А., Круговой А.Н., Пашков Е.В. Патент на полезную модель Индивидуальный аппарат жидкостного дыхания в условиях гипербарии замкнутого типа. Регистрационный номер: RU 215 479 U1 от 14.12.2022.
23. Поливцев В.П., Поливцев В.В., Пашков Е.В., Калинин М.И. Патент на полезную модель Аппарат жидкостного дыхания. Регистрационный номер: RU 209 285 U1 от 14.03.2022.
24. Поливцев В.П., Поливцев В.В., Пашков Е.В. Патент на полезную модель Аппарат жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром Регистрационный номер: RU 215 480 U1 от 14.12.2022.
25. Ф. Уитон Техническое обеспечение агрокультуры монография / Ф. Уитон – М.: Агропромиздат. 1985 – 528с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Kilstra, Dzh.A. O myshakh kak o rybakh / Dzh.A. Kilstra, M.O. Tissing, A. van der Men, R. P. de Graaf//Per. Amerikanskogo obshchestva iskusstvennykh vnutrennikh organov. – 1962, Tom. 8, №1. – S. 378-383.
2. Klark, L.K. Vyzhivaniye mlekopitayushchikh, dyshashchikh organicheskimi zhidkostyami, uravnoveshennymi kislorodom pri atmosfernom davlenii/L.K. Klark, F. Gollan//Nauka. – 1966, Tom. 152. – S. 1755-1756.
3. Vol'fson, M.R. Legochnyye primeneniya perftorkhimicheskikh zhidkostey: ventilyatsiya i ne tol'ko / M.R. Vol'fson, T.KH. Shaffer//Pediater Respir Resp. – 2005, Tom. 6, №2. – S. 117-27.
4. Kilstra, Dzh.A. Osushchestvleniye zhidkostnogo dykhaniya u cheloveka / Dzh.A. Kilstra//Upravleniye voyenno-morskikh issledovaniy. Arlington, Virdzhiniya 22217, otchet N00014-67-A-O25-OO7, data 28.02.77.
5. Kandler, M.A. Stoykoye uluchsheniye gazoobmena i mekhaniki legkikh s pomoshch'yu aerazol'nogo perftorugleroda/M.A. Kandler, K. von der Hardt, E. Schoof, J. Dötsch, W. Rascher//American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 2001, Tom. 164, №1. – S. 31-35.
6. Gollan, F. Podatlivost' i diffuziya pri dykhanii s ftoruglerodnoy zhidkost'yu/F. Gollan, Dzh. Makdermott, A.E. Dzhonson, R. Namon//Federation Proceedings. – 1970, t. 1, s. 29, №5. – S. 1725-1730.
7. Koen, P. Flyuoruglerodnaya ventilyatsiya: maksimal'nyye potoki vydokha i eliminatsiya SO₂/P. Koen, M.R. Vol'fson, T.KH. Shaffer // Pediatricheskiye issledovaniya. – 1988, Vyp. 24. – S. 291-296.
8. Moroz V.V. Zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh, yeye vozmozhnosti i perspektivy (sovremennoye sostoyaniye voprosa)/V.V. Moroz, A.V. Vlasenko,

-
- I.O. Zaks//Anesteziologiya i reanimatologiya. – 2001, №6. – S. 66-73.
9. Moroz V.V. Endotrakheal'noye primeneniye perftorana v usloviyakh IVL u bol'nykh s allergicheskim respiratornym distress-sindromom/V.V. Moroz, D.A. Ostapchenko, A.V. Vlasenko, P.YU. Osipov, L.V. Gerasimov//Obshchaya reanimatologiya. – 2005. – S. 5-11.
10. Poptsov V.N. Pervyy lechebnyy opyt ispol'zovaniya chastichnoy zhidkostnoy ventilyatsii na osnove endobronkhial'nogo napravleniya perftorana v kompleksnoy terapii respiratornogo distress-sindroma/V.N. Poptsov, A.Ye. Balandyuk//Biomeditsinskiy zhurnal Medline.ru. – 2004, T.5. – S. 173-174.
11. Sarkar, S. Zhidkostnaya ventilyatsiya/S. Sarkar, A. Pasvan, S. Prakas//Anesth Essays Res. – 2014, Tom 8, №3. – S. 277-282.
12. Koks, K.A. Zhidkostnaya ventilyatsiya: vsestonniy obzor/C.A. Koks, M.R. Vol'fson, T.KH. Shaffer//Neonatal'naya set'. – 1996, T.15, №3. – S. 31-43.
13. Kirmse, M. Polozhitel'noye davleniye v kontse vydokha uluchshayet gazoobmen i legochnuyu mekhaniku pri chastichnoy zhidkostnoy ventilyatsii/M. Kirmse, YU. Fudzhino, D. Gess, R.M. Kachmarek//Amerikanskiy zhurnal respiratornoy i reanimatologicheskoy meditsiny. – 1998, Vyp. 158, №5 CH. 1. – S.1550-1556.
14. Kelli, K.P. Chastichnaya zhidkostnaya ventilyatsiya - perelistyvaya STRANITSU po evolyutsii/K.P. Kelli // Britanskiy zhurnal anestezii. – 1997, Vyp. 78, №1. – S. 1-2.
15. Devis M.V. Vliyaniye ob'yema dozy perftorugleroda pri zapuske chastichnoy zhidkostnoy ventilyatsii/M.V. Devis, K.R. Danster, K. Uilson, P.B. Kol'dits // Zhurnal pediatrii i detskogo zdorov'ya. – Tom. 46, №12. – S. 714-722.
16. Lemaire, F. Nizkiye dozy perftorugleroda: vozrozhdeniye chastichnoy zhidkostnoy ventilyatsii? /F. Lemer//Reanimatologiya. – 2007, Tom. 35, №2. – S. 662-663.
17. Kachmarek R.M. Chastichnaya zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh u vzroslykh patsiyentov s ostrym respiratornym distress-sindromom / R.M. Kachmarek, KH.P. Videmann, P.T. Lavin i dr.//Amerikanskiy zhurnal respiratornoy i intensivnoy terapii. – 2006, Tom. 173, №8 CH. 1. – S. 882-889.
18. Balakin A.I. Issledovaniye modulyatsii desaturatsii apparata zhidkostnoy iskusstvennoy ventilyatsii legkikh / A.I. Balakin, V.V. Polivtsev, V.A. Titkov // Avtomatizatsiya i izmereniye v mashino-priborostroyenii, – 2022. – № 2(18). – S. 87-96.
19. Krugovoy A.N. Razrabotka eksperimental'nogo obraztsa individual'nogo glubokovodnogo apparata / A.N. Krugovoy, A.A. Chetverkin // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologiy. - №2 (352). - 2022. - S. 168-172.
20. Polivtsev V.P. Individual'nyy apparat zhidkostnogo dykhaniya s zamknutoy tsirkulyatsiyey dykhatel'noy zhidkosti / V.P. Polivtsev [i dr.] // Avtomatizatsiya i

- izmereniye v mashino-priborostroyenii. - 1 (17). -2022. - S. 88-95.
21. Polivtsev V.P. Apparat zhidkostnogo dykhaniya so struynym oksigenatorom dykhatel'noy zhidkosti / V.P. Polivtsev, Ye.V. Pashkov, V.V. Polivtsev // Avtomatizatsiya i izmereniye v mashino-priborostroyenii. - 2 (18). - 2022 - S.41-51.
22. Chetverkin A.A., Krugovoy A.N., Pashkov Ye.V. Patent na poleznuyu model' Individual'nyy apparat zhidkostnogo dykhaniya v usloviyakh giperbarii zamknutogo tipa. Registratsionnyy nomer: RU 215 479 U1 ot 14.12.2022.
23. Polivtsev V.P., Polivtsev V.V., Pashkov Ye.V., Kalinin M.I. Patent na poleznuyu model' Apparat zhidkostnogo dykhaniya. Registratsionnyy nomer: RU 209 285 U1 ot 14.03.2022.
24. Polivtsev V.P., Polivtsev V.V., Pashkov Ye.V. Patent na poleznuyu model' Apparat zhidkostnogo dykhaniya s zamknutym dykhatel'nym konturom Registratsionnyy nomer: RU 215 480 U1 ot 14.12.2022.
25. F. Uiton Tekhnicheskoye obespecheniye agrokul'tury monografiya / F. Uiton – M.: Agropromizdat. 1985 – 528s.

¹Поливцев Виктор Петрович, заведующий лабораторией, VPPolivtsev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Поливцев Владимир Викторович, руководитель группы, VVPolivtsev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Балакин Алексей Игоревич, к.т.н, доцент, ведущий научный сотрудник, AIBalakin@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

STUDY OF THE PROCESS OF LIQUID GAS SATURATION IN A CLOSED LOOP LIQUID BREATHING APPARATUS

V.P. Polivtsev, V.V. Polivtsev, A.I. Balakin

Studies of liquid breathing technology for the process of gas saturation of the liquid are proposed. Developed designs of medical liquid breathing devices with a closed breathing circuit, based on the ultrasonic gas removal scheme and two schemes of oxygenation (saturation) of breathing fluid one by barbotage and the other mixed with barbotage and jet pump. An engineering method for determining the rate of fluid gas saturation for schemes with barbotage has been developed. Empirical dependences of the coefficient determining the oxygen

saturation rate and oxygen concentration in the liquid are obtained. Graphs confirming the possibility of using the obtained empirical dependences are given.

Keywords. Overpressure, fluid breathing, ultrasound, breathing fluid, closed breathing circuit.

Viktor Petrovich Polivtsev, head of the laboratory, VPPolivtsev@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

Polivtsev Vladimir Viktorovich, candidate of technical sciences, Docent, Leading researcher, VVPolivtsev@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Balakin Alexey Igorevich, candidate of technical sciences, Docent, Leading researcher, AIBalakin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗВЕНЬЕВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ РУКИ НА ПОГРЕШНОСТЬ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Балакина Н.А., Балакин А.И.

***Аннотация.** Рассмотрены погрешности измерения координатно-измерительных машин. Приведена математическая модель для оценки точности измерительной руки. Рассмотрено влияние температурных деформаций звеньев измерительной руки на погрешность координатных измерений. Представлены результаты моделирования и проведен их анализ, показавший степень влияния температурных деформаций на точность измерительной руки при использовании различных материалов звеньев.*

***Ключевые слова.** Координатные измерения, векторный анализ, погрешность, точность измерений, температурная погрешность, температурная деформация.*

В настоящее время широкое распространение получают координатно-измерительные машины (КИМ) типа – измерительная рука. Данные средства измерения являются гибкими и широкоуниверсальными, позволяющими производить контроль сложных поверхностей. Функционирование таких средств измерений основано на использовании метода координатных измерений, что в свою очередь позволяет автоматизировать обработку результатов измерений [1-7]. Таким образом использование координатно-измерительных машин позволяет повысить точность и достоверность результатов измерений, что в свою очередь повышает надежность устройств и обеспечивает их функционирование в заданном режиме.

Одной из основных характеристик функционирования средств измерения является их погрешность. Для КИМ она состоит из погрешности сбора информации – погрешности измерения координат точек и погрешности обработки и представления результатов измерений, которые в свою очередь, состоят из компонент, определяемых устройством аппаратной части и системой программно-математического обеспечения КИМ, параметрами измеряемых деталей, факторами окружающей среды, источников энергии, времени измерений и эксплуатации КИМ [1].

Исследованию точности функционирования КИМ посвящено множество работ. Однако в настоящий момент не все вопросы, связанные с оценкой погрешности измерений КИМ типа измерительная рука, рассмотрены.

В работе [8] приводится анализ влияния погрешности изготовления длин звеньев и погрешности энкодеров на точность измерений измерительной руки.

Однако при использовании средств измерений кроме точности изготовления длин звеньев на погрешность работы средства измерения оказывает влияние колебания температуры в помещении, приводящие к температурным деформациям звеньев измерительной руки.

Целью работы является оценка влияния температурных деформаций звеньев на погрешность измерительной руки.

Рассмотрим семиосную измерительную руку, кинематическая схема которой представлена на **Рис.1**. Кинематика данной измерительной руки подробно была рассмотрена в [8].

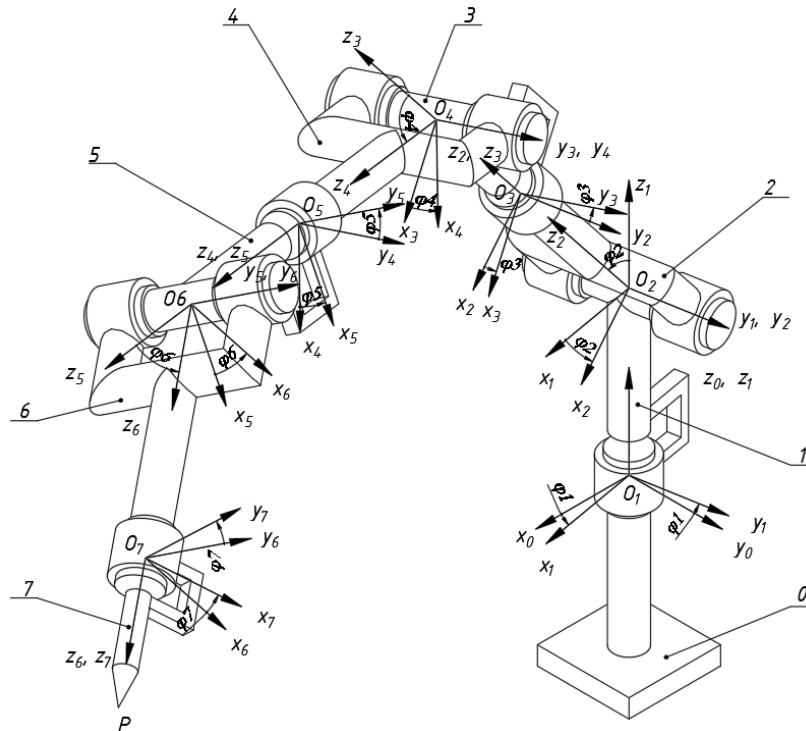


Рис. 1 – Кинематическая схема измерительной руки

Для анализа точности работы измерительной руки воспользуемся элементами векторного анализа, используемого при проектировании робототехнических устройств [9]. Результаты векторного анализа для данной кинематической схемы приведены в [8]. Вектор координаты точки P определяется выражением:

$$\begin{aligned} \overline{OP} = & \overline{O_1O_2} + M_{01} \cdot \overline{O_2O_3} + M_{02} \cdot \overline{O_3O_4} + M_{03} \cdot \overline{O_4O_5} + \\ & + M_{04} \cdot \overline{O_5O_6} + M_{05} \cdot \overline{O_6O_7} + M_{06} \cdot \overline{O_7P}. \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом его можно записать следующим образом:

$$\overline{OP} = f(lz_1, lz_2, lz_3, lz_4, lz_5, lz_6, lz_7, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6).$$

Как было указано в [1], практически ориентировочная максимальная погрешность измерения на КИМ может оцениваться как

$$\Delta_{\max} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}, \quad (2)$$

где Δx , Δy , Δz – координатные погрешности КИМ по оси x , y и z соответственно.

Эта оценка максимальной погрешности приблизительно характеризует точность измерения координат положения и размеров.

Для оценки влияния температурных деформаций звеньев на погрешность измерительной руки найдем вектор погрешности координат точки P имеющий вид:

$$\overline{OP}(\Delta) = f(lz_1 + \Delta lz_{1t}, lz_2 + \Delta lz_{2t}, lz_3 + \Delta lz_{3t}, lz_4 + \Delta lz_{4t}, lz_5 + \Delta lz_{5t}, lz_6 + \Delta lz_{6t}, lz_7 + \Delta lz_{7t}, \varphi_1 + \Delta \varphi_1, \varphi_2 + \Delta \varphi_2, \varphi_3 + \Delta \varphi_3, \varphi_4 + \Delta \varphi_4, \varphi_5 + \Delta \varphi_5, \varphi_6 + \Delta \varphi_6). \quad (3)$$

В данном выражении также учитывается погрешность углов поворота, определяемая точностью энкодеров.

Погрешность определения координат точки P определяются выражением:

$$\Delta \overline{OP} = \overline{OP} - \overline{OP}(\Delta).$$

С учетом выражений (1) и (3) получим:

$$\begin{aligned} \Delta \overline{OP} = & f(lz_1, lz_2, lz_3, lz_4, lz_5, lz_6, lz_7, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6) - \\ & - f(lz_1 + \Delta lz_{1t}, lz_2 + \Delta lz_{2t}, lz_3 + \Delta lz_{3t}, lz_4 + \Delta lz_{4t}, lz_5 + \Delta lz_{5t}, lz_6 + \\ & + \Delta lz_{6t}, lz_7 + \Delta lz_{7t}, \varphi_1 + \Delta \varphi_1, \varphi_2 + \Delta \varphi_2, \varphi_3 + \Delta \varphi_3, \varphi_4 + \Delta \varphi_4, \varphi_5 + \Delta \varphi_5, \varphi_6 + \Delta \varphi_6). \end{aligned}$$

Полученные координаты вектора $\Delta \overline{OP}$ позволяют на основе выражения (2) определить максимальную погрешность одного измерения на КИМ $\Delta_{\max}$.

Так как при моделировании требуется рассмотреть весь диапазон работы руки, то в качестве ее предельной суммарной погрешности $\Delta_{np\Sigma}$ принимается наибольшее значение из максимальных значений погрешности единичных измерений $\Delta_{\max}$, т.е.

$$\Delta_{np\Sigma} = \max(\Delta_{\max}).$$

Моделирование погрешности измерительной руки осуществляется при следующих значениях конструктивных параметров:

$lz_1 = 200$ мм, $lz_2 = 1000$ мм, $lz_3 = 100$ мм, $lz_4 = 700$ мм, $lz_5 = 100$ мм, $lz_6 = 100$ мм, $lz_7 = 200$ мм.

Углы поворотов звеньев измерительной руки в процессе контроля могут изменяться в пределах:

$\varphi_1 = 0...360^\circ$, $\varphi_2 = 0...120^\circ$, $\varphi_3 = 0...360^\circ$, $\varphi_4 = 0...180^\circ$, $\varphi_5 = 0...360^\circ$, $\varphi_6 = 0...225^\circ$, $\varphi_7 = 0...360^\circ$.

На основе проведенного анализа, приведенного в [8], принимаем погрешность энкодеров равную 5".

Материалы, из которых изготавливаются звенья измерительной руки могут быть различными. В настоящее время для этих целей наиболее широко используются алюминиевые сплавы и термостабильные углепластики. Эти материалы обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, с точки зрения веса изделия и прочности. Рассмотрим погрешности возникающие при изменении температуры в зависимости от используемых материалов.

Коэффициенты температурного расширения материалов следующие [10]:

- алюминий $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$;
- углепластик ПСБ250/А $\alpha = 3,8 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$;
- углепластик ПСБ250/В $\alpha = -0,6 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$;
- углепластик КМУ-4Э $\alpha = 2,7 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$.

Для определения погрешности, вызванной температурной деформацией звеньев, воспользуемся известной формулой для определения температурной погрешности:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t, \quad (4)$$

где Δl – величина температурной деформации звена, l – длина звена, Δt – колебание температуры.

Используя выражение (4), определим величины температурных деформаций для каждого из звеньев, входящего в состав измерительной руки при изменении температуры на 5°C . Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Погрешности длин звеньев, вызванные изменением температуры

Материал	Температурные погрешности длин звеньев, мм						
	Δl_{1t}	Δl_{2t}	Δl_{3t}	Δl_{4t}	Δl_{5t}	Δl_{6t}	Δl_{7t}
алюминий	0,0238	0,119	0,0119	0,0833	0,0119	0,0119	0,0238
углепластик ПСБ250/А	0,0038	0,019	0,0019	0,0133	0,0019	0,0019	0,0038
углепластик ПСБ250/В	-0,0006	-0,003	-0,0003	-0,0021	-0,0003	-0,0003	-0,0006
углепластик КМУ-4Э	0,0027	0,0135	0,00135	0,00945	0,00135	0,00135	0,0027

Предельная суммарная погрешность измерительной руки представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета предельной суммарной погрешности измерительной руки

Квалитет	5				6				7			
Материал	алюминий	углепластик ПСБ250/А	углепластик ПСБ250/В	углепластик КМУ-4Э	алюминий	углепластик ПСБ250/А	углепластик ПСБ250/В	углепластик КМУ-4Э	алюминий	углепластик ПСБ250/А	углепластик ПСБ250/В	углепластик КМУ-4Э
$\Delta_{np\Sigma}$, мм	0,455	0,224	0,177	0,212	0,521	0,287	0,237	0,274	0,658	0,422	0,37	0,409

При расчете суммарной предельной погрешности учитывалась точность изготовления звеньев.

Сравним полученные результаты с данными, приведенными в таблице 3 полученными в [8].

Таблица 3 – Результаты расчета погрешности от точности линейных размеров звеньев измерительной руки

Квалитет	5	6	7
$\Delta_{np\Sigma}$, мм	0,183	0,244	0,377

Таблица 3 характеризует погрешность измерительной руки без учета температурных деформаций.

Произведя анализ полученных результатов, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, температурная деформация звеньев оказывает существенное влияние на точность работы измерительной руки.

Во-вторых, использование алюминия в качестве конструкционного материала при изготовлении звеньев измерительной руки возможно только в случае ее не высокой точности. Таким образом использование в качестве конструкционного материала углепластиков предпочтительно.

В-третьих, подбором вида углепластиков можно не только уменьшить величину температурной деформации звеньев, но и получить погрешность измерительной руки меньше, чем без учета температурных деформаций (например, для углепластика ПСБ250/В).

Библиографический список

1. Координатные измерительные машины и их применение / В.-А.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов [и др.] – М.: Машиностроение, 1988 – 328 с.
2. Автоматизация измерений при применении координатных измерительных машин / А.Е. Кобринский, Е.И. Левковский, А.Е. Рукин [и др.] // Станки и инструменты. – 1979. – № 1 – С. 9-12
3. Григораш О.В. Алгоритм и средства модернизации системы управления координатно-измерительной машины: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Казань, 2010. – 22 с.
4. Хорлоогийн А.С. Точность координатных средств измерений / А.С. Хорлоогийн, О.С. Астапчик, Д.В. Дубицкий // 9-я межд. науч.-техн. конф. «Приборостроение -2016». – 2016. – С. 229-231.
5. Координатно-измерительные машины для контроля тел вращения / Б.С. Бражкин [и др.]. – Москва: Миттель Пресс, 2012. – 207 с.
6. Никольский С.М. Исследование влияния температуры на точность работы координатно-измерительной машины / С.М. Никольский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 417-423.
7. Зубарев Ю.М. Автоматизация координатных измерений в машиностроении: учебное пособие для вузов / Ю. М. Зубарев, С. В. Косаревский. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 160 с.
8. Балакина, Н.А. Исследование влияния точности изготовления измерительной руки на погрешность координатных измерений / Н.А. Балакина, И.А. Балакин // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2023. – № 1(21). – С. 78-86.
9. Зенкевич С.Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. пособие / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.
10. Аккуратов И.Л. Результаты исследований свойств углепластиков на основе различных полимерных связующих, перспективных для изготовления конструкций космической техники / И.Л. Аккуратов [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2018. – № 1(20)/2018. – С. 54 – 66.

Bibliograficheskiy spisok

1. Koordinatnyye izmeritel'nyye mashiny i ikh primeneniye / V.-A.A. Gapshis, A.YU. Kasparaytis, M.B. Modestov [i dr.] – M.: Mashinostroyeniye, 1988 – 328 s.
2. Avtomatizatsiya izmereniy pri primenении koordinatnykh izmeritel'nykh mashin / A.Ye. Kobrinskiy, Ye.I. Levkovskiy, A.Ye. Rukin [i dr.] // Stanki i instrumenty. – 1979. – № 1 – S. 9-12

3. Grigorash O.V. Algoritm i sredstva modernizatsii sistemy upravleniya koordinatno-izmeritel'noy mashiny: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.05. – Kazan', 2010. – 22 s.
4. Khorloogiyn A.S. Tochnost' koordinatnykh sredstv izmereniy / A.S. Khorloogiyn, O.S. Astapchik, D.V. Dubitskiy // 9-ya mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Priborostroyeniye -2016». – 2016. – S. 229-231.
5. Koordinatno-izmeritel'nyye mashiny dlya kontrolya tel vrashcheniya / B.S. Brazhkin [i dr.]. – Moskva: Mittel' Press, 2012. – 207 s.
6. Nikol'skiy S. M. Issledovaniye vliyaniya temperatury na tochnost' raboty koordinatno-izmeritel'noy mashiny / S.M. Nikol'skiy // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2022. – № 4. – S. 417-423.
7. Zubarev YU. M. Avtomatizatsiya koordinatnykh izmereniy v mashinostroyenii: uchebnoye posobiye dlya vuzov / YU. M. Zubarev, S.V. Kosarevskiy. – 4-ye izd., ster. – Sankt-Peterburg: Lan', 2021. – 160 s.
8. Balakina, N.A. Issledovaniye vliyaniya tochnosti izgotovleniya izmeritel'noy ruki na pogreshnost' koordinatnykh izmereniy / N.A. Balakina, I.A. Balakin // Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino- priborostroyenii. – 2023. – № 1(21). – S. 78-86.
9. Zenkevich S.L. Upravleniye robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami: ucheb. posobiye / S.L. Zenkevich, A.S. Yushchenko. – M.: izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2000. – 400 s.
10. Akkuratov I.L. Rezul'taty issledovaniy svoystv ugleplastikov na osnove razlichnykh polimernykh svyazuyushchikh, perspektivnykh dlya izgotovleniya konstruktsiy kosmicheskoy tekhniki / I.L. Akkuratov [i dr.] // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. – 2018. – № 1(20)/2018. – S. 54 – 66.

*Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель,
NABalakina@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

*Балакин Алексей Игоревич, к.т.н., доцент, AIBala-kin@mail.sevsu.ru,
Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

INFLUENCE OF TEMPERATURE DEFORMATIONS OF MEASURING ARM LINKS ON COORDINATE MEASUREMENT ERROR

N.A. Balakina, I.A. Balakin

*Measurement errors of coordinate measuring machines are considered. A
mathematical model for estimating the accuracy of a measuring arm is given.*

The influence of temperature deformations of measuring arm links on the error of coordinate measuring is considered. Simulation results are presented and their analysis, which has shown the degree of influence of temperature deformations on the accuracy of a measuring arm using different link materials, is carried out.

Keywords: coordinate measurements, vector analysis, error, measurement accuracy, temperature error, temperature deformation.

Balakina Natalya Anatolyevna, senior lecturer, NABalakina@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Balakin Alexey Igorevich, candidate of technical sciences, docent, AIBalakin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №2(22) 2023 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,

адрес типографии ФГАОУ ВО СевГУ:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

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.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
№ рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 19.06.2023. Заказ 25/2023. Дата выхода в свет: 26.06.2023. Тираж: 50 экз.
Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 12,2.

Севастополь, 2023