

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№4(12)
2020

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, 2020

Главный редактор
Копп В.Я., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Заместитель главного редактора
Филипович О.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Научный редактор
Бохонский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Ответственный секретарь
Майстришин М.М., к.т.н.
(г. Севастополь)

Редакционная коллегия
Пашков Е.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Скатков А.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Песчанский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Рзаев Р.Р., д.т.н., проф.
(г. Баку)
Прейс В.В., д.т.н., проф.
(г. Тула)
Кристалл М.Г., д.т.н., проф.
(г. Волгоград)
Дьяченко В.А., д.т.н., проф.
(г. Санкт-Петербург)
Волков А.Н., д.т.н., проф.
(г. Санкт-Петербург)
Петрешин Д.И., д.т.н., проф.
(г. Брянск)
Доронина Ю.В., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Васютенко А.П., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Балакин А.И., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Круговой А.Н., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Скидан А.А., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Рапацкий Ю.Л., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Заморёнов М.В., к.т.н.
(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Бохонский А.И., Варминская Н.И., Майстришин М.М., Рыжков А.И.** 3
Защита объектов электроники при интенсивных динамических воздействиях
- Доронина Ю.В., Скатков А.В.** Вероятностный анализ остаточного ресурса 14
иерархической производственной системы
- Сидоров С.М., Обжерин Ю.Е., Никитин М.М.** Анализ надежности и 22
эффективности нефтепровода с резервуарными парками
- Копп В.Я., Флоря П.Н., Заморёнов М.В.** Исследование функционирования 33
однокомпонентной системы с учетом календарной профилактики
- Доронина Ю.В.** Принцип типизации участков эшелонированного 43
деградационного процесса производственной системы
- Бохонский А.И., Майстришин М.М., Рыжков А.И.** Снижение 52
энергоёмкости реверсионно конструируемого переносного ускорения объекта
- Песчанский А.И.** Оптимизация сроков профилактики одноканальной 61
системы обслуживания при ограниченной информации о системе
- Копп В.Я., Леонтьев В.В., Липка В.М., Рапацкий Ю.Л.** Моделирование 71
методом конечных элементов тепловых явлений при шлифовании
однониточным кругом резьбы на заготовках резьбонакатных роликов
- Доронина Е.Б., Скатков А.В.** Система поддержки принятия решений по 78
выбору эффективной структуры варианта технологического процесса
ремонтно-профилактических работ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Васютенко А.П., Заморёнова Д.В.** Моделирование статических 87
характеристик пневмотерморезистивного измерительного прибора

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Майстришин М.М., Филипович О.В., Гарматюк М.И., Салиенко А.В.** 93
Этапы разработки опытного образца автономной эндоскопической
видеосистемы
- Круговой А.Н.** Переносное автоматизированное устройство для сердечно- 102
легочной реанимации с электроприводом
- Осипов К.Н., Поливцев В.П.** Экспериментальная оценка эффективных и 108
безопасных режимов непрямого аппаратного массажа сердца

УДК 621.888.6

ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.², Майстришин М.М.³, Рыжкова Н.П.⁴

Аннотация. *Исследовано поведение объектов при интенсивных динамических воздействиях в случае, когда традиционные средства не защищают от разрушения; используются разрушающиеся (выключающиеся) связи при заданном пороге перемещения объекта в сочетании с упруго-пластическими связями. Показано, что комбинированная защита приборов от интенсивных воздействий (удары, взрывы) приводит к эффективному снижению ускорений объекта.*

Ключевые слова. *Объект электроники, выключающиеся упругие связи, упруго-пластические связи, эффективная защита прибора.*

Линейная теория виброзащиты объектов техники развита и отражена в трудах [1-10]. Для снижения динамической вибрационной нагрузки на объекты достаточно чтобы частоты собственных колебаний линейных систем были меньше частот сложного гармонического вибрационного воздействия. Пассивным нелинейным системам виброзащиты и активным (автоматически управляемым) посвящена специальная литература [1]. Оптимальное управление колебаниями систем отражено в монографии [6]. Следует отметить, что при необходимости защитить объект в случае чрезвычайных воздействий применима нетрадиционная защита, например, с использованием пластического деформирования связей.

Моделированию динамики систем с учетом пластических свойств материалов при воздействиях большой интенсивности посвящены работы [11-18] и другие. В рамках допущений о работе материала в пластической стадии (использование диаграммы Прандтля) продолжают оставаться трудности в строгом задании параметров деформирования, при которых возможно эффективное снижение ускорения (**Рис.1**).

Цель исследования – сопоставление характера динамического поведения объектов электроники при использовании вариантов защиты в виде комбинаций выключающихся упруго-пластических связей.

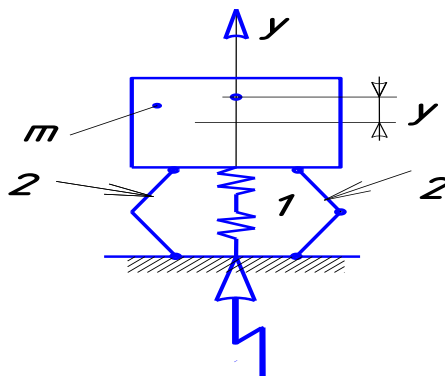


Рис.1 – Схема объекта со связями: 1 – упругая выключающаяся; 2 – упруго-пластическая связь.

Динамическая нагрузка представляет собой резонансное гармоническое воздействие либо ударный импульс ускорения, который может быть заменен в первом приближении эквивалентной начальной скоростью. Рассматриваются варианты защиты объекта при заданных воздействиях.

1. Резонанс в упругой системе. Явление резонанса в линейной системе здесь используется для сравнения с движением упруго-пластической системы и вариантов защиты с учетом выключающейся (разрушающейся) связи. Без учета сопротивления используется управление движения, описывающее резонансный режим движения объекта:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + k^2 y = A \sin kt, \quad (1)$$

где k – частота собственных колебаний системы с одной степенью свободы $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$,

c – коэффициент жесткости упругой связи; m – масса объекта. Решение уравнения (1) имеет вид:

$$y(t) = \frac{4}{2k} \left(\frac{1}{k} \sin kt - t \cos kt \right), \quad \ddot{y}(t) = \frac{1}{2k} (kt \cos kt + \sin kt). \quad (2)$$

В данном и последующих примерах при анализе использованы общие исходные данные: $m = 40 \text{ кг}$; $c = 10^5 \text{ Н/м}$; $k = \sqrt{\frac{c}{m}} = 50 \text{ с}^{-1}$; $A = 10 \text{ м/с}^2$. Время движения $T = 1 \text{ с}$. График ускорения линейной системы изображен на **Рис.2**.

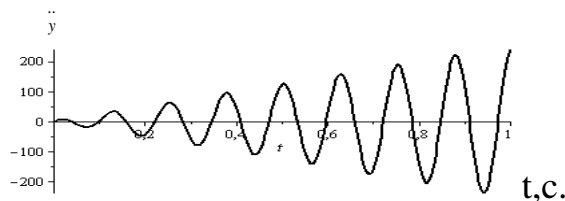


Рис. 2 – Ускорение в резонансе линейной системы.

2. Движение объекта при резонансе (на упругом участке) в упруго-пластической системе. В этом случае уравнение нелинейное:

$$\ddot{y} + \frac{1}{m} \cdot Q(y) = A \sin kt, \quad (3)$$

где восстанавливающая сила вычисляется следующим образом:

$$Q_{i+1} = Q_i + c(y_{i+1} - y_i); \text{ если } Q_{i+1} \leq -Q_0, \text{ то } Q_{i+1} := -Q_0; Q_{i+1} \geq Q_0, \text{ то } Q_{i+1} := Q_0, \quad (4)$$

Q_0 – значение восстанавливающей силы в пластической стадии.

При построении графиков с использованием численного интегрирования уравнения методом Рунге-Кутты IV-го порядка с прежними исходными данными принято дополнительно $Q_0 = 100H$. Графики движения объекта изображены на **Рис.3**.

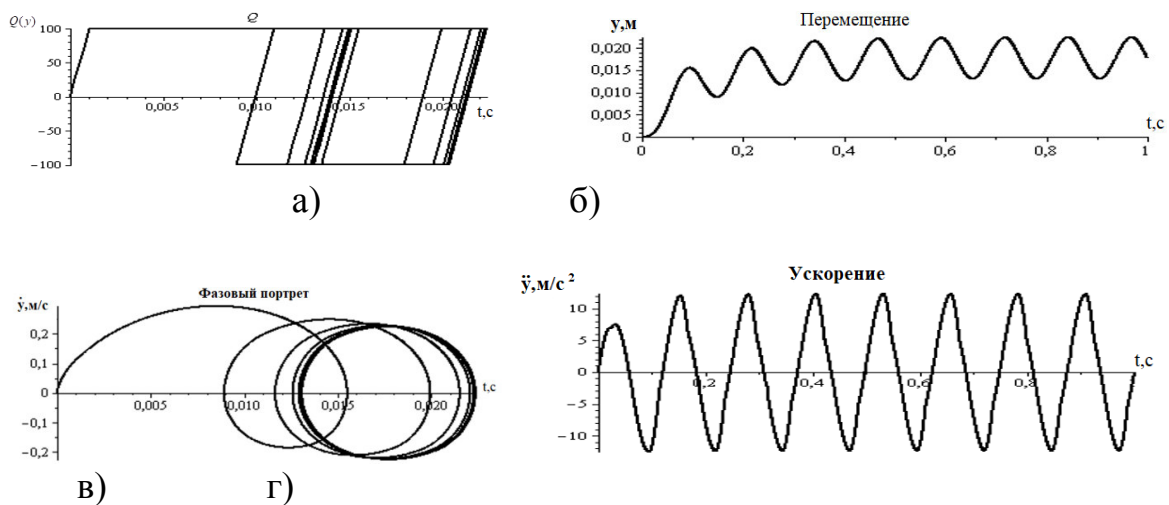


Рис.3 – Резонанс в упруго-пластической системе:

а) диаграмма деформирования; б) перемещение; в) фазовый портрет; г) ускорение

Ускорение в упруго-пластической системе при резонансе на упругом участке существенно меньше, чем в линейной системе. С уменьшением Q_0 ускорение уменьшается, но при этом увеличивается перемещение.

3. Ударный импульс (ускорение) в линейной системе. При поиске решения импульс был заменен начальной скоростью. График ускорения объекта и фазовый портрет изображены на **Рис.4**. После действия импульса объект движется с максимальным по абсолютной величине ускорением $a = 10 м / с^2$. На **Рис.4** изображены графики ускорения и фазовый портрет.

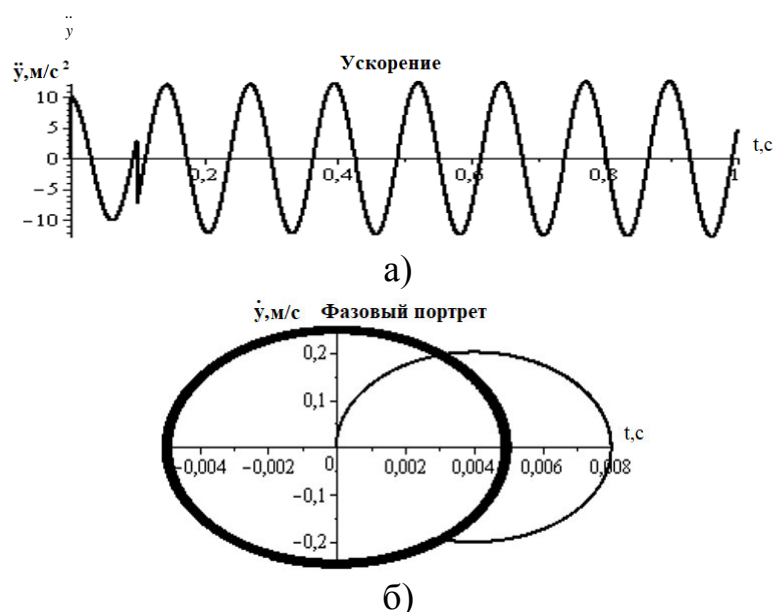


Рис.4 – Линейная система (импульс ускорение):
а) ускорение; б) фазовый портрет

Важно отметить, что ускорение объекта после действия импульса не превышает (по абсолютной величине) 2 m/s^2 .

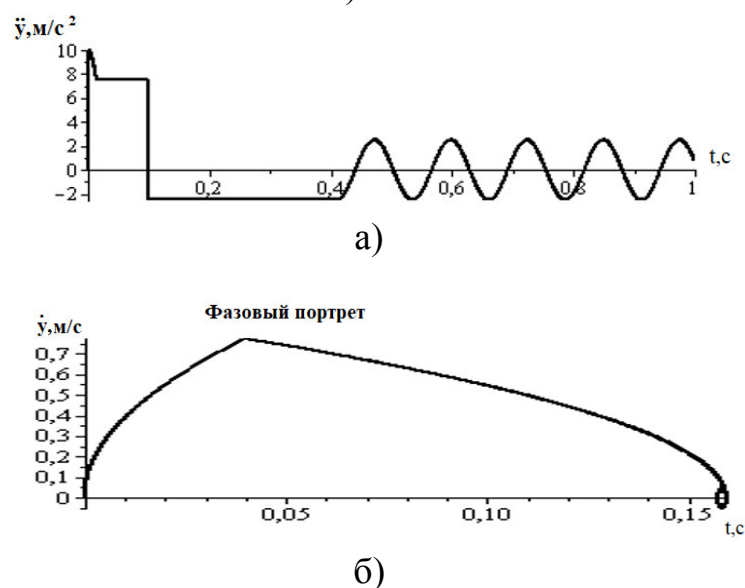


Рис.5 – Движение упруго-пластической системы (импульс)

5. Использование выключающейся и упруго-пластической связи при импульсном воздействии. Импульсное воздействие с целью упрощения задано в виде начальной скорости. При выключении (разрушении) упругой связи с достижением заданного порога перемещения защищаемого объекта скачкообразно уменьшается жесткость. Диаграмма деформирования изображена на **Рис.6**.

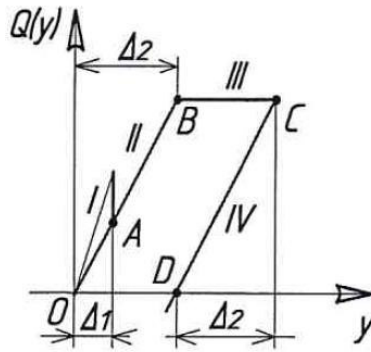


Рис.6 – Диаграмма деформирования систем с упругой выключающейся и упруго-пластической связями

После отключения упругой связи остается упругий участок упруго-пластической связи и дальше при движении оставшаяся связь переходит в пластическую стадию. Таким образом, общая диаграмма деформирования системы с нетрадиционной защитой состоит из четырех участков, причем пластическое состояние появляется на третьем участке. При достижении точки С происходит упругая разгрузка и наблюдаются свободные колебания около нового положения равновесия (точка D). Для описания движения на каждом участке использован метод припасовывания. Уравнение движения на первом участке:

$$\ddot{y}_1 \cdot k_1^2 y_1 = 0, \quad (6)$$

где частота $k_1 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{m}}$; C_1 и C_2 – коэффициенты жесткости. В качестве ударного воздействия используется мгновенный импульс, что соответствует начальным условиям:

$$y_1(0) = 0, \quad \dot{y}_1(0) = V_0. \quad (7)$$

Решение уравнения (6) с учетом условий (7) записывается следующим образом:

$$y_1(t) = \frac{V_0}{k_1} \sin k_1 t, \quad \dot{y}_1(t) = V_0 \cos k_1 t. \quad (8)$$

Задано перемещение объекта Δ_1 , при котором выключается связь. Из (8) следуют выражения для перемещения и скорости объекта в момент разрушения связи:

$$\Delta_1 = \frac{V_0}{k_1} \sin k_1 t_1, \quad V_1 = V_0 \cos k_1 t_1. \quad (9)$$

Для определения V_1 время движения найдено из трансцендентного уравнения:

$$\frac{V_0}{k_1} \sin k_1 t - \Delta_1 = 0. \quad (10)$$

Перемещение и скорость (9) – начальные условия при движении на втором участке, для которого уравнение движения:

$$\ddot{y}_2 + k_2^2 y_2 = 0, \quad (11)$$

$$y_2(t) = B_1 \sin k_2 t + B_2 \cos k_2 t, \quad \dot{y}_2(t) = B_1 k_2 \cos k_2 t - B_2 k_2 \sin k_2 t,$$

где $k_2 = \sqrt{\frac{C_2}{m}}$. С учетом начальных условий $y_2(0) = \Delta_1$, $\dot{y}_2(0) = V_1$ движение на втором участке описывается зависимостями:

$$y_2(t) = \frac{V_1}{k_2} \sin k_2 t + \Delta_1 \cos k_2 t, \quad \dot{y}_2(t) = V_1 \cos k_2 t - \Delta_1 k_2 \sin k_2 t, \quad (12)$$

Время движения на втором участке находится из условия:

$$\frac{V_1}{k_2} \sin k_2 t_2 + \Delta_1 \cos k_2 t_2 - (\Delta_2 - \Delta_1) = 0. \quad (13)$$

Приобретенная объектом скорость в конце движения на 2 участке:

$$V_2 = V_1 \cos k_2 t_2 - \Delta_1 k_2 \sin k_2 t_2. \quad (14)$$

Для третьего участка с начальными условиями $y_3(0) = 0$, $\dot{y}_3(0) = V_2$, следуют зависимости:

$$y_3(t) = V_2 t - \frac{Q_0 t^2}{2}, \quad \dot{y}_3(t) = V_2 - Q_0 t, \quad (15)$$

С учетом $\dot{y}_3(t_3) = 0$, время движения и перемещение на третьем участке

$$t_3 = \frac{V_2}{Q_0}, \quad y_3 = V_2 t_3 - \frac{Q_0 t_3^2}{2}. \quad (16)$$

Снизить ускорение объекта при импульсном воздействии возможно при варьировании параметров Δ_1 и Q_0 .

Численный пример. Упруго-пластическая система с выключающейся связью.

Исходные данные: $C_1 = 10^3 \text{ Н/м}$; $C_2 = 10^4 \text{ Н/м}$; $m = 40 \text{ кг}$;
 $k_1 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{m}} = 52,4 \text{ с}^{-1}$; $k_2 = \sqrt{\frac{C_2}{m}} = 15,8 \text{ с}^{-1}$; $\Delta_1 = 0,05 \text{ м}$; $\Delta_2 = 0,11 \text{ м}$.

Результаты вычислений: В момент выключения связи: $t_1 = 0,014 \text{ с}$; $V_1 = 3,020 \text{ м/с}$. При достижении точки B диаграммы деформирования: общее время движения $t_2^* = t_1 + t_2 = 0,014 + 0,003 = 0,017 \text{ с}$. скорость объекта $V_2 = 0,117 \text{ м/с}$. При достижении точки C время движения равно $t_3^* = t_2^* + t_3 = 0,017 + 0,004 = 0,021 \text{ с}$, скорость движения $V_c = 0$. Общее перемещение: $\Delta = \Delta_2 + 0,0003 \text{ м} = 0,1103 \text{ м}$.

Принципиально важно, что ускорение объекта в данном примере не превышает величины $\frac{C_2 \cdot \Delta_2}{m} = Q_0 = 27,5 \text{ м/с}^2$. Если связь не разрушается, а упруго-пластическая связь заменена упругой, то ускорение объекта при заданном воздействии в несколько раз больше, чем в системе с нетрадиционной защитой. При только пластическом деформировании связи должно выполняться условие $\frac{F \cdot G_T}{m} \leq [a]$, где F – площадь поперечного сечения связи, G_T – нормальное напряжение в состоянии текучести

материала, m – масса объекта, $[a]$ – допускаемое нормативное ускорение объекта.

Выводы. Пластическое демпфирование колебаний приводит к снижению в несколько раз динамической нагрузки на объект. Применение комбинированной защиты требует достоверной информации о воздействии и предварительного широкого численного эксперимента с вариацией исходных параметров системы. В наиболее ответственных случаях должны проектироваться три уровня защиты объекта электроники: пассивная, управляемая (активная) и нетрадиционная.

Библиографический список

1. Коловский М.З. Нелинейная теория виброзащитных систем. Изд-во «Наука», М., 1966. – 220с.
2. Коловский М.З. Автоматическое управление виброзащитными системами, Изд-во «Наука», М, 1976. – 320 с
3. Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем.- М.: Машиностроение, 1980 . – 276 с.
4. Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Радио и связь, 1984. – 223 с.
5. Коренев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения. – М.: Наука, 1988. – 304 с.
6. Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н. Управление колебаниями. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
7. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т.-Т.2. Колебания механических систем / Под ред. И.И. Блехмана.- М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.
8. Ильинский В.С. Вопросы изоляции вибрации и ударов / В.С. Ильинский. – М.: Сов. Радио, 1960. – 365 с.
9. Ильинский В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В.С. Ильинский. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.
10. Белявский Н.Г. Конструктивная амортизация механизмов, приборов и аппаратуры на судах / Н.Г. Белявский. – М.:Судостроение, 1965.–523с.
11. Божко А.Е. Пассивная и активная виброзащита судовых механизмов / А.Е. Божко, А.Ф. Галь, А.П. Гуров и др.- Л.: Наука, 1987. – 176 с.
12. Дикович И.А. Динамика упругопластических балок / И.А. Дикович.– М.: Судпромгиз, 1962. – 292 с.

13. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов/А.Р. Ржаницын. – М.: Госстройиздат, 1954. – 288 с.
14. Бохонский А.И. Защита от динамических воздействий объектов как абсолютно твердых тел / А.И. Бохонский//Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология. Вып.6. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1997. – С.7-14.
15. Бохонский А.И. Деформации упругопластической системы при учете горизонтальной и вертикальной составляющих сейсмического воздействия//А.И. Бохонский/Реферативный сборник «Сейсмическое строительство. Отечественный и зарубежный опыт», вып.5. – М.: Центр ин-т науч.инф.по строительству и архитектуре, 1974. – С. 46-49.
16. Бохонский А.И. Модели упругопластического деформирования стержней//А.И. Бохонский, А.В.Исаев/Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология, Вып.80. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С.15-19.
17. Бохонский А.И. Управляемое гашение изгибных колебаний стержня/ А.И. Бохонский // Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология, Вып.15.-Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1998. –С.15-20.
18. Бохонский А.И. Крутильно-поступательные колебания упругопластических систем / А.И. Бохонский //Строительство и архитектура.Сер.Строительство в особых условиях. Сейсмическое строительство, Вып.1. – М.: ЦИНИС. Госстрой СССР, 1983. – с.21-24.
19. Бохонский А.И., Галкина Н.Г., Адаптивная система защиты приборов от вибрационных и импульсных воздействий большой интенсивности/ А.И. Бохонский, Н.Г. Галкина//Приборостроение, № 43. – 1992. – С.71-75.

Bibliograficheskiy spisok

1. Kolovskiy M.Z. Nelineynaya teoriya vibrozashchitnykh sistem. Izd-vo «Nauka», M., 1966. – 220s.
2. Kolovskiy M.Z. Avtomaticheskoe upravlenie vibrozashchitnymi sistemami, Izd-vo «Nauka», M, 1976. – 320 s
3. Frolov K.V., Furman F.A. Prikladnaya teoriya vibrozashchitnykh sistem.- M.: Mashinostroenie, 1980 . – 276 s.
4. Tokarev M.F., Talitskiy E.N., Frolov V.A. Mekhanicheskie vozdeystviya i zashchita radioelektronnoy apparatury. - M.: Radio i svyaz', 1984. – 223 s.
5. Korenev B.G., Reznikov L.M. Dinamicheskie gasiteli kolebaniy: Teoriya i tekhnicheskie prilozheniya. – M.: Nauka, 1988. – 304 s.

6. Chernous'ko F.L., Akulenko L.D., Sokolov B.N. Upravlenie kolebaniyami. – M.: Nauka, 1980. – 384 s.
7. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti t.-T.2. Kolebaniya mekhanicheskikh sistem / Pod red. I.I. Blekhmana.- M.: Mashinostroenie, 1979. – 351 s.
8. Il'inskiy V.S. Voprosy izolyatsii vibratsii i udarov / V.S. Il'inskiy. – M.: Sov. Radio, 1960. – 365 s.
9. Il'inskiy V.S. Zashchita REA i pretsizionnogo oborudovaniya ot dinamicheskikh vozdeystviy / V.S. Il'inskiy. – M.: Radio i svyaz', 1982. – 296 s.
10. Belyavskiy N.G. Konstruktivnaya amortizatsiya mekhanizmov, priborov i apparatury na sudakh / N.G. Belyavskiy. – M.: Sudostroenie, 1965. – 523 s.
11. Bozhko A.E. Passivnaya i aktivnaya vibrozashchita sudovykh mekhanizmov / A.E. Bozhko, A.F. Gal', A.P. Gurov i dr.- L.: Nauka, 1987. – 176 s.
12. Dikovich I.A. Dinamika uprugoplasticheskikh balok / I.A. Dikovich.– M.: Sudpromgiz, 1962. – 292 s.
13. Rzhantsyn A.R. Raschet sooruzheniy s uchetom plasticheskikh svoystv materialov/A.R. Rzhantsyn. – M.: Gosstroyizdat, 1954. – 288 s.
14. Bokhonskiy A.I. Zashchita ot dinamicheskikh vozdeystviy ob"ektov kak absolyutno tverdykh tel / A.I. Bokhonskiy//Vestnik SevGTU. Mekhanika, energetika, ekologiya. Vyp.6. – Sevastopol': Izd-vo SevGTU, 1997. – S.7-14.
15. Bokhonskiy A.I. Deformatsii uprugoplasticheskoy sistemy pri uchete gorizontal'noy i vertikal'noy sostavlyayushchikh seysmicheskogo vozdeystviya//A.I. Bokhonskiy/Referativnyy sbornik «Seysmicheskoe stroitel'stvo. Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt», vyp.5. – M.: Tsentr in-t nauch.inf.po stroitel'stvu i arkhitekture, 1974. – S. 46-49.
16. Bokhonskiy A.I. Modeli uprugoplasticheskogo deformirovaniya sterzhney//A.I. Bokhonskiy, A.V.Isaev/Vestnik SevGTU. Mekhanika, energetika, ekologiya, Vyp.80. – Sevastopol':Izd-vo SevNTU, 2007.–S.15-19.
17. Bokhonskiy A.I. Upravlyaemoe gashenie izgibnykh kolebaniy sterzhnya/ A.I. Bokhonskiy // Vestnik SevGTU. Mekhanika, energetika, ekologiya, Vyp.15.-Sevastopol': Izd-vo SevGTU, 1998. –S.15-20.
18. Bokhonskiy A.I. Krutil'no-postupatel'nye kolebaniya uprugoplasticheskikh sistem / A.I. Bokhonskiy //Stroitel'stvo i arkhitektura.Ser.Stroitel'stvo v osobykh usloviyakh. Seysmicheskoe stroitel'stvo, Vyp.1. – M.: TsINIS. Gosstroy SSSR, 1983. – s.21-24.

19. Bokhonskiy A.I., Galkina N.G., *Adaptivnaya sistema zashchity priborov ot vibratsionnykh i impul'snykh vozdeystviy bol'shoi intensivnosti/* A.I. Bokhonskiy, N.G. Galkina//*Priborostroenie*, № 43. – 1992. – S.71-75.

¹*Бохонский Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

²*Варминская Наталья Ивановна, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, nvarminska@gmail.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училища имени П.С. Нахимова*

³*Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц., mihail.maystrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

⁴*Рыжкова Наталья Павловна, канд. техн. наук, доц., Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училища имени П.С. Нахимова*

PROTECTION OF ELECTRONIC OBJECTS UNDER INTENSIVE DYNAMIC IMPACT

A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, M.M. Maystrishin, N.P. Ryzhkova

The behavior of objects under intense dynamic influences in the case when traditional means do not protect against destruction have been investigated; collapsing (switching off) ties are used at a given threshold of object movement in combination with elastic-plastic ties. It is shown that the combined protection of devices from intense influences (impacts, explosions) leads to an effective decrease in the acceleration of the object.

Keywords: an object of electronics, disconnected elastic links, elastic-plastic links, effective protection of the device.

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

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

Maystrishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, mihail.maystrishin@gmail.com Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

*Ryzhkova Natalia Pavlovna, candidate of technical sciences, docent,
Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimova*

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Дороница Ю.В.¹, Скатков А.В.²,

***Аннотация.** Исследуется остаточный ресурс в сложных иерархических производственных системах на основе вероятностной модели. Этот подход позволил получать вероятностные оценки остаточного ресурса для принятия решений по интенсификации пополнения ресурса ресурсоемких производств. Предложена схема двухконтурной системы поддержки принятия решений, позволяющая принимать решения по оценкам вероятностей гипотез и вероятностям условных событий.*

***Ключевые слова.** Производственная система, вероятность, анализ эффективности, ресурсные характеристики.*

Исследование характеристик ресурсоемких производственных систем (РПС) реализуется в процессах их анализа и синтеза на основе аналитического или имитационного подходов и часто связано с проблемой размерности, заключающейся как в объеме требуемой априорной информации для моделирования, так и в структурной сложности отображений, реализующих процесс исследования [1-4]. При построении полимодельных комплексов (ПМК) для анализа ресурсных характеристик РПС возникает ряд задач, связанных с необходимостью взаимодействия моделей между собой, передачи данных результатов работы одной модели в другую, что может приводить к росту промежуточных данных; необходима при оценке качества комплексов моделей, порожденных их структурной сложностью и топологическим многообразием.

Таким образом, моделирование ресурсных характеристик при сложных топологиях модельных комплексов актуально для отраслевых предприятий.

Цель работы – построение вероятностной модели для оценки остаточных ресурсов при решении прикладных задач по исследованию функционирования РПС иерархического типа.

Для решения задачи оценки остаточного ресурса будем использовать следующую структурную иерархию РПС: детали (уровень А) – узлы (уровень В) – агрегаты (уровень С) – система в целом (уровень РПС). Обозначим остаточные ресурсы, требуемые на каждом уровне иерархии как RA , RB , RC , RPC , **Рис.1**. Для определенного класса систем уровни А, В, С, СТС являются естественными структурными единицами, например, для систем в области машиностроения или информационно-управляющих систем.

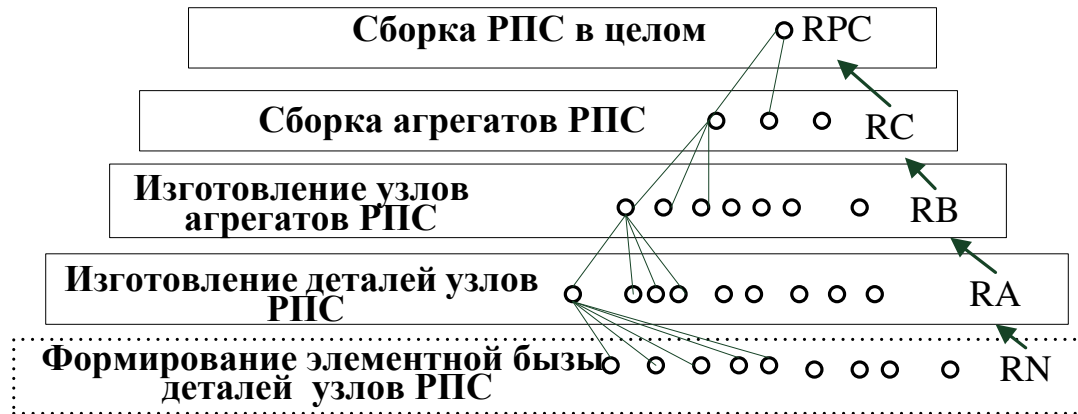


Рис.1 – Схема обобщенной иерархической организации операций ресурсоемких производственных систем

Требования к ресурсам на каждом уровне иерархии РПС (**Рис.1**) определяются компонентами $RPC(t_0, X, \mu)$, где t_0 – начальный момент времени оценки остаточного ресурса РПС, X – множество характеристик остаточного ресурса РПС.

Рассмотрим некоторый отрезок времени жизни системы $[0, T]$, с учетом t_{k-1} и $t_k \in [0, T]$, где $t_{k-1} < t_k < t_{k+1}$; можно формализовать динамику изменения остаточного ресурса для каждого уровня иерархии: $N(t_{k-1}) \rightarrow RN(t_k)$, $N \in \{A, B, C, РПС\}$. Для одноуровневой одноэлементной системы в заданный момент времени $t_{k-1} < t_k < t_{k+1}$ требуемый остаточный ресурс может быть определен как

$$R1(t_k) = \min\{(\alpha_0 R0(t_{k-1}) + \alpha_1 \psi_1(v_k, t_k) + \alpha_2 \varphi_1(u_k, t_k) + \alpha_3 \xi_1(t_{k-1}) + \alpha_4 + \mu_1(t_k) + \alpha_5 \varepsilon_1)\}, \quad (1)$$

где $R0(t_k)$, $R1(t_{k-1})$ – остаточные ресурсы 0-го и 1-го уровней в соответствующие моменты времени (t_k) , (t_{k-1}) ;

$\psi_1(v_k, t_k)$ – функция, описывающая убывание ресурса вследствие воздействия условий внешней среды, в которой функционирует РПС;

$\varphi_1(u_k, t_k)$ – функция, описывающая убывание ресурса вследствие различных режимов работы (рабочих циклов РПС);

$\xi_1(t_k)$ – функция, описывающая убывание ресурса вследствие естественных причин деградации РПС (старение, коррозия, износ, усталость), отражающая их влияние на ресурсные характеристики;

$\mu_1(t_k)$ – функция, описывающая рост ресурса вследствие проведения профилактических работ с учетом работы персонала по регламенту и ошибок персонала;

ε_1 – случайная функция, отражающая интенсивность влияния неопределенности условий функционирования на ресурсные характеристики РПС;

$\alpha_0, \dots, \alpha_5$ – коэффициенты, определяющие степень воздействия указанных функций на ресурсные характеристики РПС.

Рассмотрим событие A , связанное с критически низким остаточным уровнем ресурса РПС и сформулируем гипотезу H_{RPC} – об остаточном уровне ресурса РПС при ресурсоемком режиме эксплуатации (РРЭ). Согласно теореме Байеса, вероятность того, что критический уровень остаточного ресурса при РРЭ будет достигнут, может быть определена как

$$P(H_{RPC} | A) = \frac{P(A | H_{RPC})P(H_{RPC})}{P(A)}, \quad (2)$$

где $P(H_{RPC})$ – заданные априорные вероятности, а вероятность события A определяется по формуле полной вероятности с учетом иерархической структуры РПС:

$$P(A) = P(H_{RPC})P(A | H_{RPC}) + P(H_{RC})P(A | H_{RC}) + P(H_{RB})P(A | H_{RB}) + \\ + P(H_{RA})P(A | H_{RA}) + P(H_{RN})P(A | H_{RN}) = \sum_{Ri \in \{\mathbb{R}\}} P(H_{Ri})P(A | H_{Ri}), \quad (3)$$

$$Ri \in \{\mathbb{R}\} = \{RPC \cup RC \cup RB \cup RA \cup RN\},$$

где $H_{RPC}, H_{RC}, H_{RB}, H_{RA}, H_{RN}$ – гипотезы об остаточных уровнях ресурсов соответствующих иерархических уровней РПС.

Выражение $P(H_{RPC} | A)$ с учетом формулы Байеса может быть записано при условии того, что событие $A \equiv A_{RPC}$ происходит при исчерпании остаточных ресурсов нижестоящих иерархических уровней.

$$P(H_{RPC} | A_{RPC}) = \frac{P(A_{RPC} | H_{RPC})P(H_{RPC})}{S}, \\ S = P(H_{RPC})P(A_{RPC} | H_{RPC}) + P(H_{RC})P(A_{RC} | H_{RC}) + P(H_{RB})P(A_{RB} | H_{RB}) + \\ + P(H_{RA})P(A_{RA} | H_{RA}) + P(H_{RN})P(A_{RN} | H_{RN}), \quad (5)$$

Для уровня сборки агрегатов РПС (рис.1) вероятность того, что критический уровень остаточного ресурса (RC) при РРЭ будет достигнут, равна:

$$P(H_{RC} | A_{RC}) = \frac{P(A_{RC} | H_{RC})P(H_{RC})}{P(A_{RC})}, \quad (6)$$

где $P(H_{RC})$ – заданные априорные вероятности,

$$P(A_{RC}) = \sum_{Rj \in \{RC \cup RB \cup RA \cup RN\}} P(H_{Rj})P(A | H_{Rj}).$$

С учетом (3-5) формула (2) примет вид:

$$P(H_{RPC} | A_{RC}) = \frac{P(A_{RC} | H_{RPC})P(H_{RPC})}{\sum_{R_j \in \{RC \cup RB \cup RA \cup RN\}} P(H_{R_j})P(A | H_{R_j})}. \quad (7)$$

Для других уровней РПС вероятность того, что критический уровень остаточного ресурса при РРЭ будет достигнут, в соответствии с (3), может быть оценена с учетом иерархической схемы ПМК:

$$P(H_{RA} | A_{RA}) = \frac{P(A_{RA} | H_{RA})P(H_{RA})}{P(A_{RA})} = \frac{P(A_{RA} | H_{RA})P(H_{RA})}{\sum_{R_j \in \{RA \cup RN\}} P(H_{R_j})P(A | H_{R_j})} = \quad (8)$$

$$= \frac{P(A_{RA} | H_{RA})P(H_{RA})}{P(H_{RA})P(A_{RA} | H_{RA}) + P(H_{RN})P(A_{RN} | H_{RN})};$$

$$P(H_{RA} | A_{RN}) = \frac{P(A_{RN} | H_{RA})P(H_{RA})}{P(A_{RN})} = \frac{P(A_{RN} | H_{RA})P(H_{RA})}{P(H_{RN})P(A_{RN} | H_{RN})};$$

$$P(H_{RB} | A_{RB}) = \frac{P(A_{RB} | H_{RB})P(H_{RB})}{P(A_{RB})} = \frac{P(A_{RB} | H_{RB})P(H_{RB})}{\sum_{R_m \in \{RB \cup RA \cup RN\}} P(H_{R_m})P(A_{R_m} | H_{R_m})} = \quad (9)$$

$$= \frac{P(A_{RB} | H_{RB})P(H_{RB})}{P(H_{RB})P(A_{RB} | H_{RB}) + P(H_{RA})P(A_{RA} | H_{RA}) + P(H_{RN})P(A_{RN} | H_{RN})};$$

$$P(H_{RB} | A_{RA}) = \frac{P(A_{RA} | H_{RB})P(H_{RB})}{P(A_{RA})} = \frac{P(A_{RA} | H_{RB})P(H_{RB})}{\sum_{R_l \in \{RA \cup RN\}} P(H_{R_l})P(A_{R_l} | H_{R_l})} = \quad (10)$$

$$= \frac{P(A_{RA} | H_{RB})P(H_{RB})}{P(H_{RA})P(A_{RA} | H_{RA}) + P(H_{RN})P(A_{RN} | H_{RN})};$$

$$P(H_{RC} | A_{RC}) = \frac{P(A_{RC} | H_{RC})P(H_{RC})}{P(A_{RC})} = \frac{P(A_{RC} | H_{RC})P(H_{RC})}{\sum_{R_d \in \{RC \cup RB \cup RA \cup RN\}} P(H_{R_d})P(A_{R_d} | H_{R_d})} =$$

$$= \frac{P(A_{RC} | H_{RC})P(H_{RC})}{P(H_{RC})P(A_{RC} | H_{RC}) + P(H_{RB})P(A_{RB} | H_{RB}) + P(H_{RA})P(A_{RA} | H_{RA}) + L};$$

$$L = P(H_{RN})P(A_{RN} | H_{RN});$$

$$P(H_{RC} | A_{RB}) = \frac{P(A_{RB} | H_{RC})P(H_{RC})}{P(A_{RB})} = \frac{P(A_{RB} | H_{RC})P(H_{RC})}{\sum_{R_l \in \{RB \cup RA \cup RN\}} P(H_{R_l})P(A_{R_l} | H_{R_l})} = \quad (11)$$

$$= \frac{P(A_{RB} | H_{RC})P(H_{RC})}{P(H_{RB})P(A_{RB} | H_{RB}) + P(H_{RA})P(A_{RA} | H_{RA}) + P(H_{RN})P(A_{RN} | H_{RN})};$$

$$P(H_{RN} | A_{RN}) = \frac{P(A_{RN} | H_{RN})P(H_{RN})}{P(A_{RN})}. \quad (12)$$

$$P(A_{RB} | H_{RB}) = \frac{P(H_{RB} | A_{RB})P(A_{RB})}{P(H_{RB})}; P(A_{RA} | H_{RB}) = \frac{P(H_{RB} | A_{RA})P(A_{RA})}{P(H_{RB})}.$$

Остальные условные вероятности находятся аналогичным образом. При увеличении числа иерархий имеет место рекурсия подстановок вероятностных оценок нижестоящих уровней.

Учитывая (8) – (11) и преобразования (12), значение S в выражении (5) для этого случая примет вид:

$$S^* = P(H_{RPC})P(A_{RPC} | H_{RPC}) + P(A_{RC})P(H_{RC} | A_{RC}) + P(A_{RB})P(H_{RB} | A_{RB}) + P(A_{RA})P(H_{RA} | A_{RA}) + P(H_{RN})P(A_{RN} | H_{RN}).$$

На основании приведенных формул появилась возможность предложить структуру системы поддержки принятия решений (СППР) по оперативному пополнению ресурсов иерархических производственных систем. На **Рис.2** приведена двухконтурная схема СППР: по контуру вероятностных гипотез и по контуру вероятностей условных событий.

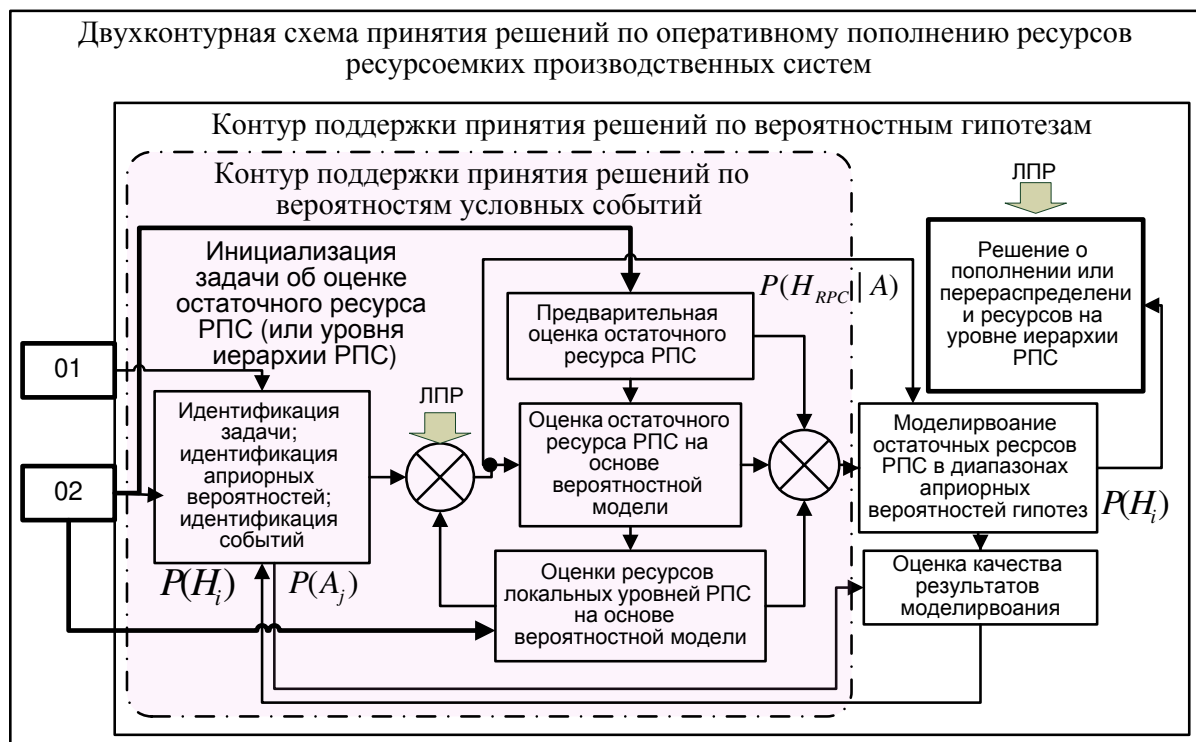


Рис.2 – Двухконтурная схема системы поддержки принятия решений по оперативному пополнению ресурсов иерархических производственных систем

На схеме СППР (**Рис.2**): O1 и O2 – входы, определяющие задачу (на каком уровне будет исследоваться остаточный ресурс РПС) и задающие априорные вероятности соответственно.

Особенностями приведенной на **Рис.2** СППР является двухконтурная структура с возможностью принятия решений по оценкам вероятностей

гипотез и по оценкам вероятностей условных событий, что позволит, в зависимости от информации об априорных вероятностях, а также исходя из поставленных перед СППР задач, выбрать из эффективного множества оптимальное решение с учетом мнения ЛПР.

Развитие исследований, представленных авторами в статье, предполагается в направлении численного моделирования вероятностных оценок остаточного ресурса, характерных для современного производства РПС, а также анализа чувствительности и устойчивости вычислительных процессов.

Библиографический список

1. Юсупов Р. М., Соколов Б. В. и др. Методологические и методические основы теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов *Информация и космос*, 2018. № 3, с. 36–43.
2. Panella I., Hardwick G. Model Oriented System Design Applied to Commercial Aircraft Secondary Flight Control Systems. In: Obaidat M., Cren T., Rango F. (eds) *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SIMULTECH 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019, vol. 873, pp. 55–76.
3. Антипов И.В., Корнеев М.В. Моделирование надежности технологических процессов методом группового учета аргументов // "Теория и практика проектирования, строительства и эксплуатации высокопроизводительных подземных рудников", М.- 1990.- С. 202-203.
4. Микони С. В., Соколов Б. В. Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. М, РАН, 2018, 314 с.
5. Доронина Ю. В., Скатков А. В. Анализ статистической устойчивости стационарных марковских моделей Труды СПИИРАН, 2019, №5(18), с.1119-1148. doi 10.15622/sp.2019.18.5.1119-1148
6. Копп В.Я. Моделирование переналаживаемых автоматизированных производственных систем / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский, Чуб О.П. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. — 232 с.
7. Доронина Ю. В., Скатков А. В. (2020). Каскадно – иерархическое моделирование в задачах анализа динамики ресурсных характеристик сложных систем. *Информационно-управляющие системы*, (3), 48-58. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-3-48-58>.
8. Okhtilev M. Yu., Gnidenko A. S., Alferov V. V., Salukhov V. I., Nazarov D. I. Methods and Algorithms of Integrated Modeling of Complex Technical Objects in Dynamically Changing Conditions // *Proceedings of the International Scientific Conference MMET NW*. 2018. pp. 282–284.

Bibliograficheskiy spisok

1. Yusupov R. M., Sokolov B. V., etc. Methodological and methodological foundations of the theory of quality assessment of models and polymodel complexes Information and space, 2018. no. 3, pp. 36-43.
2. Panella I., Hardwick G. Model Oriented System Design Applied to Commercial Aircraft Secondary Flight Control Systems. In: Obaidat M., Chap T., Rango F. (eds) Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SIMULTECH 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. 2019, vol. 873, pp. 55–76.
3. Antipov I. V., Korneev M. V. Modeling of reliability of technological processes using the method of group account of arguments // "Theory and practice of design, construction and operation of high-performance underground mines", M. - 1990.- Pp. 202-203.
4. Mikoni S. V., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Qualimetry of models and polymodel complexes: monograph. M, RAS, 2018, 314 p.
5. Doronina Yu. V., Skatkov A.V. Analysis of statistical stability of stationary Markov models Proceedings of spiiran, 2019, no. 5 (18), pp. 1119-1148. doi 10.15622/sp. 2019. 18. 5. 1119-1148
6. Kopp V. Ya. Modeling of reconfigurable automated production systems / V. Ya. Kopp, Yu. E. Obzherin, A. I. Peschansky, Chub O. P.-Sevastopol: SevNTU publishing House, 2007. - 232 p.
7. Doronina Yu. V., Skatkov A.V. (2020). Cascade-hierarchical modeling in problems of analyzing the dynamics of resource characteristics of complex systems. Information and control systems, (3), 48-58. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-3-48-58>.
8. Okhtilev M. Yu., Gnidenko A. S., Alferov V. V., Salukhov V. I., Nazarov D. I. Methods and Algorithms of Integrated Modeling of Complex Technical Objects in Dynamically Changing Conditions / / Proceedings of the International Scientific Conference MMET NW. 2018. pp. 282-284.

¹*Доронина Юлия Валентиновна, д-р техн. наук, доц., проф.,
YVDoronina@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

²*Скатков Александр Владимирович, д-р техн. наук, проф.,
AVSkatkov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

*FULL PROBABILISTIC ANALYSIS OF THE REMAINING RESOURCE
OF A HIERARCHICAL PRODUCTION SYSTEM*

Yu.V Doronina, A.V. Skatkov

Research and forecasting of the effectiveness of a technical or information system are related to the formation of a model of its functioning. The model should take into account the results of the system's activities and the means to implement those activities. In contrast to the traditional view of efficiency, the article considers the model taking into account the system aging in the framework of the analysis of its life cycle, which allowed to clarify the forecast of the system characteristics.

Keyword: production system, probability, efficiency analysis, resource characteristics.

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

Skatkov Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, AVSkatkov@sevsu.ru, Sevastopol, Sevastopol State University

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕФТЕПРОВОДА С РЕЗЕРВУАРНЫМИ ПАРКАМИ

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

Аннотация. Современная техническая система, состоящая из многих компонентов, должна обладать высокой надежностью, что обеспечивает актуальность задачи повышения надежности и эффективности ее функционирования. Одним из методов решения этой задачи является временное резервирование. В данной работе проводится анализ влияния мгновенно пополняемого резерва времени на характеристики надежности и эффективности одностороннего нефтепровода с резервуарными парками. В качестве математической модели системы используется полумарковская модель с общим фазовым пространством состояний многокомпонентной системы с поэлементным резервом времени, построенная авторами в работе [10].

Ключевые слова. Полумарковский процесс, резерв времени, системы трубопроводов, резервуарный парк, характеристики надежности и эффективности.

Многие современные технические системы описываются полумарковскими моделями [1, 2, 4-6, 9]. Они позволяют не только математически описывать систему, но и решать задачи нахождения и анализа характеристик надежности и эффективности. Однако важной проблемой остается задача повышения надежности и эффективности функционирования этих систем. С этой целью используется техническое обслуживание [3-5], упреждающее восстановление [6], временное резервирование [7-9].

Временное резервирование [2, 7-9] предоставляет системе в процессе функционирования возможность израсходовать некоторое дополнительное время (резерв времени) на восстановление работоспособности. Для систем с резервом времени существует возможность восстановить работоспособность за резервное время, следовательно, нарушение работоспособности не обязательно сопровождается отказом системы.

Источниками резерва времени являются промежуточные склады, накопители, резервные источники энергии. В трубопроводных системах резерв времени обеспечивается наличием резервуарных парков. Одной из задач резервуарного парка является хранение с целью компенсации неравномерности приема-отпуска нефти (газа и т.п.), что позволяет поддерживать функционирование системы некоторое время при сбое функционирования узла.

Целью данной работы является анализ влияния резерва времени на надежность и эффективность нефтепровода с резервуарными парками.

Математической моделью нефтепровода с резервуарными парками является полумарковская модель с поэлементным резервом времени, представленная в [10], где емкость резервуарного парка соответствует величине резерва времени. Используя построенную в статье [10] модель, в данной работе найдены формулы для характеристик надежности и эффективности нефтепровода, состоящего из пяти узлов, проведен анализ влияния емкости резервуарных парков (величины резерва времени) на эти характеристики.

Рассмотрим задачу, представленную в монографии [11]. Имеется односторонний нефтепровод с резервуарными парками (для хранения промежуточных запасов нефти). Пусть каждый линейный узел (ЛУ) имеет свой резервуарный парк (поэлементный резерв времени).

Резервуарные парки в случае отказа в системе позволяют накапливать в течение некоторого времени нефть, идущую от промысла, в свободные емкости, в то же время имеющиеся запасы дают возможность снабжать потребителя нефтью бесперебойно в течение определенного времени.

Если происходит отказ i -ого ЛУ, то он не приводит к отказу всего нефтепровода до тех пор, пока не исчерпаются запасы нефти в i -том резервуарном парке.

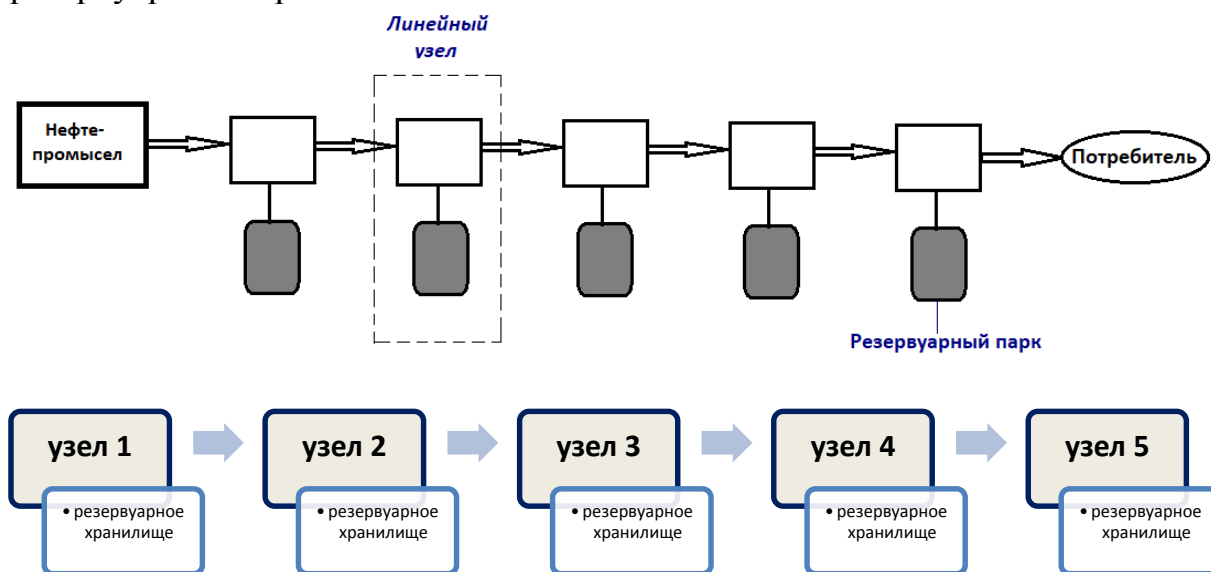


Рис.1 – Схема одностороннего нефтепровода с поэлементными резервуарными парками

Пусть

λ_i – интенсивность безотказной работы i -ого линейного узла,

μ_i – интенсивность восстановления отказавшего i -ого линейного узла,

h_i – резерв времени i -ого резервуарного парка.

Предполагается, что пополнение резервуарного парка начинается сразу же после восстановления таким образом, что к следующему отказу i -ого линейного узла i -ый резервуарный парк будет полностью заполнен (мгновенно пополняемый резерв времени).

В статье [10] получены расчетные формулы для характеристик надежности и эффективности многокомпонентной полумарковской системы с поэлементным резервом времени. Используя эти формулы, получаем расчетные формулы для нахождения стационарного коэффициента готовности K_r , средней стационарной наработки системы на отказ T_+ , среднего стационарного времени восстановления системы T_- , среднюю удельную прибыль S в единицу календарного времени и средние удельные затраты C в единицу времени исправного функционирования системы:

$$K_r = \frac{\prod_{i=1}^N (\lambda_i + \mu_i - \lambda_i e^{-\mu_i h_i})}{\prod_{i=1}^N (\lambda_i + \mu_i)}, \quad (1)$$

$$T_+ = \frac{\prod_{i=1}^N \left(\frac{\lambda_i + \mu_i - \lambda_i e^{-\mu_i h_i}}{\lambda_i \mu_i} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(e^{-\mu_i h_i} \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^N \left(\frac{\lambda_k + \mu_k - \lambda_k e^{-\mu_k h_k}}{\lambda_k \mu_k} \right) \right)}, \quad (2)$$

$$T_- = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{e^{-\mu_i h_i}}{\mu_i} \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^N \left(\frac{\lambda_k + \mu_k - \lambda_k e^{-\mu_k h_k}}{\lambda_k \mu_k} \right) \right) + \prod_{i=1}^N \frac{e^{-\mu_i h_i}}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^N \left(e^{-\mu_i h_i} \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^N \left(\frac{\lambda_k + \mu_k - \lambda_k e^{-\mu_k h_k}}{\lambda_k \mu_k} \right) \right)}, \quad (3)$$

$$S = \frac{c_1 \prod_{i=1}^N \left(\frac{\lambda_i + \mu_i - \lambda_i e^{-\mu_i h_i}}{\lambda_i \mu_i} \right) - c_2 \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{e^{-\mu_i h_i}}{\mu_i} \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^N \left(\frac{\lambda_k + \mu_k - \lambda_k e^{-\mu_k h_k}}{\lambda_k \mu_k} \right) \right) + \prod_{i=1}^N \frac{e^{-\mu_i h_i}}{\mu_i} \right]}{\prod_{i=1}^N \left(\frac{\lambda_i + \mu_i}{\lambda_i \mu_i} \right)}, \quad (4)$$

$$C = \frac{c_2 \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{e^{-\mu_i h_i}}{\mu_i} \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i}}^N \left(\frac{\lambda_k + \mu_k - \lambda_k e^{-\mu_k h_k}}{\lambda_k \mu_k} \right) \right) + \prod_{i=1}^N \frac{e^{-\mu_i h_i}}{\mu_i} \right]}{\prod_{i=1}^N \left(\frac{\lambda_i + \mu_i - \lambda_i e^{-\mu_i h_i}}{\lambda_i \mu_i} \right)}. \quad (5)$$

Стоит отметить, что в монографии [11] были получены только количественные характеристики системы (коэффициент готовности, вероятность безотказной работы и средняя наработка на отказ). Здесь же вычислены также временные характеристики (средняя стационарная наработка системы на отказ и среднее стационарное время восстановления системы) и экономические характеристики (средняя удельная прибыль в единицу календарного времени и средние удельные затраты в единицу времени исправного функционирования). Также формулы, полученные в работе [10], позволяют находить характеристики надежности и эффективности систем с поэлементным резервом времени в случае, когда случайные величины, описывающие функционирование системы, имеют распределения произвольного вида.

Пример 1. Нефтепровод состоит из $N=5$ узлов. Каждый линейный узел имеет поэлементный неслучайный резерв времени. Величина резерва времени – это время, в течение которого полностью расходуется емкость резервуарного парка, в случае отказа ЛУ. Резерв времени изменяется от 0 до 15 часов с шагом 1 час. Время безотказной работы первого линейного узла (ЛУ) $M\alpha_1=200$ часов ($\lambda_1=0,005$), второго ЛУ $M\alpha_2=181,82$ часа ($\lambda_2=0,0055$), третьего ЛУ $M\alpha_3=250$ часов ($\lambda_3=0,004$), четвертого ЛУ $M\alpha_4=222,22$ часа ($\lambda_4=0,0045$), пятого ЛУ $M\alpha_5=250$ часов ($\lambda_5=0,004$); время восстановления первого ЛУ $M\beta_1=20$ часов ($\mu_1=0,05$), второго ЛУ $M\beta_2=18,18$ часов ($\mu_2=0,055$), третьего ЛУ $M\beta_3=25$ часов ($\mu_1=0,04$), четвертого ЛУ $M\beta_4=22,2$ часа ($\mu_4=0,045$), пятого ЛУ $M\beta_5=25$ часов ($\mu_1=0,04$); прибыль, получаемая в единицу времени исправного функционирования системы, $c_1=200$ у.е., потери в единицу времени отказа $c_2=250$ у.е.

Результаты вычислений для рассматриваемой системы по формулам (1) – (5) представлены в **Таблице 1**. На **Рис.2** изображены: а) стационарный коэффициент готовности, б) средняя стационарная наработка на отказ, в) среднее стационарное время восстановления, г) средняя удельная прибыль, д) средние удельные затраты.

Таблица 1. – Влияние резерва времени на характеристики надежности и эффективности

h, ч.	K_Г	T₊, ч.	T₋, ч.	S, у.е./ч.	C, у.е./ч.
0	0,621	43,478	26,544	29,415	152,627
1	0,635	45,766	26,306	35,75	143,701
2	0,649	48,160	26,084	41,902	135,403
3	0,662	50,667	25,876	47,872	127,679
4	0,675	53,291	25,682	53,661	120,479
5	0,687	56,038	25,500	59,269	113,761
6	0,699	58,914	25,329	64,699	107,484
7	0,711	61,924	25,170	69,953	101,614
8	0,722	65,075	25,020	75,034	96,118
9	0,733	68,373	24,879	79,943	90,968
10	0,744	71,825	24,747	84,686	86,136
11	0,754	75,438	24,623	89,264	81,60
12	0,764	79,220	24,507	93,682	77,338
13	0,773	83,178	24,398	97,942	73,33
14	0,782	87,320	24,295	102,049	69,558
15	0,791	91,655	24,199	106,007	66,005

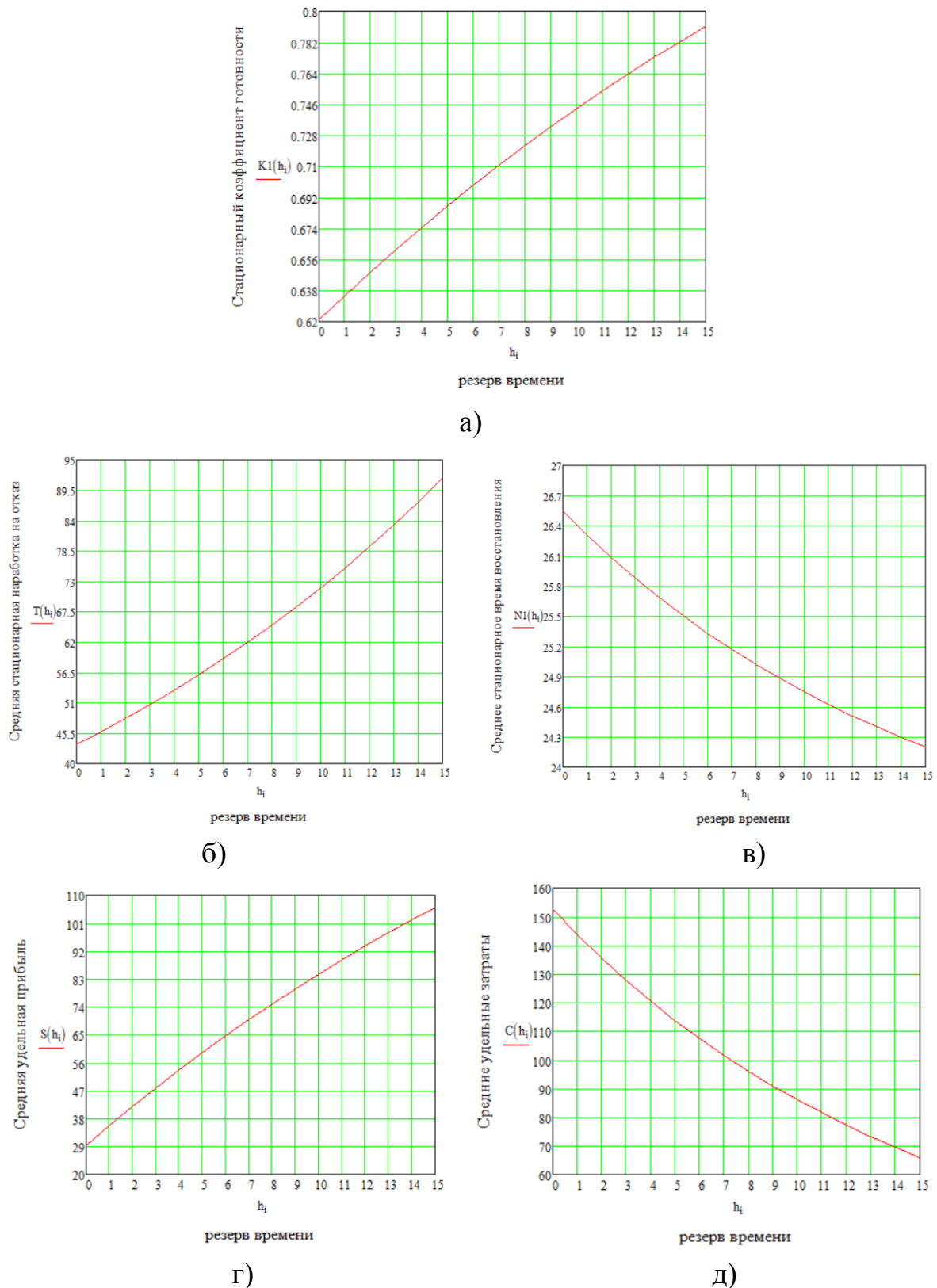


Рис.2 – Характеристики надежности и эффективности

Пример 2. Рассмотрим случай, когда резерв времени первого ЛУ h_1 изменяется от 0 до 15 часов, h_2 – от 15 до 0 ч., h_3 – от 5 до 20 ч., h_4 – от 20 до 5 ч., h_5 – от 3 до 18 часов с шагом 1 час (т.е. поэлементные резервы времени

связаны условиями: $h_1=i$, $h_2=15-i$, $h_3=i+5$, $h_4=20-i$, $h_5=i+3$, $i=0\ldots 15$ ч.). Прибыль, получаемая в единицу времени исправного функционирования системы, $c_1=150$ у.е., потери в единицу времени отказа $c_2=250$ у.е. Остальные значения совпадают с примером 1.

Результаты вычислений для рассматриваемого примера по формулам (1) – (5) представлены в **Таблице 2** и на **Рис.3**.

Таблица 2. – Влияние резерва времени на характеристики надежности и эффективности

h_1 , ч.	h_2 , ч.	h_3 , ч.	h_4 , ч.	h_5 , ч.	K_{Γ}	T_+ , ч.	T_- , ч.	S , у.е./ч.	C , у.е./ч.
0	15	5	20	3	0,715	63,557	25,295	36,124	99,498
1	14	6	19	4	0,721	64,938	25,182	38,229	96,946
2	13	7	18	5	0,725	66,201	25,070	40,129	94,675
3	12	8	17	6	0,730	67,332	24,960	41,823	92,674
4	11	9	16	7	0,733	68,320	24,850	43,311	90,935
5	10	10	15	8	0,736	69,151	24,742	44,594	89,450
6	9	11	14	9	0,739	69,817	24,635	45,670	88,215
7	8	12	13	10	0,741	70,307	24,529	46,540	87,223
8	7	13	12	11	0,743	70,614	24,425	47,201	86,473
9	6	14	11	12	0,744	70,733	24,321	47,653	85,962
10	5	15	10	13	0,745	70,660	24,219	47,894	85,690
11	4	16	9	14	0,745	70,395	24,119	47,923	85,657
12	3	17	8	15	0,744	69,939	24,021	47,738	85,865
13	2	18	7	16	0,743	69,295	23,926	47,337	86,319
14	1	19	6	17	0,742	68,470	23,834	46,717	87,022
15	0	20	5	18	0,740	67,471	23,745	45,875	87,981

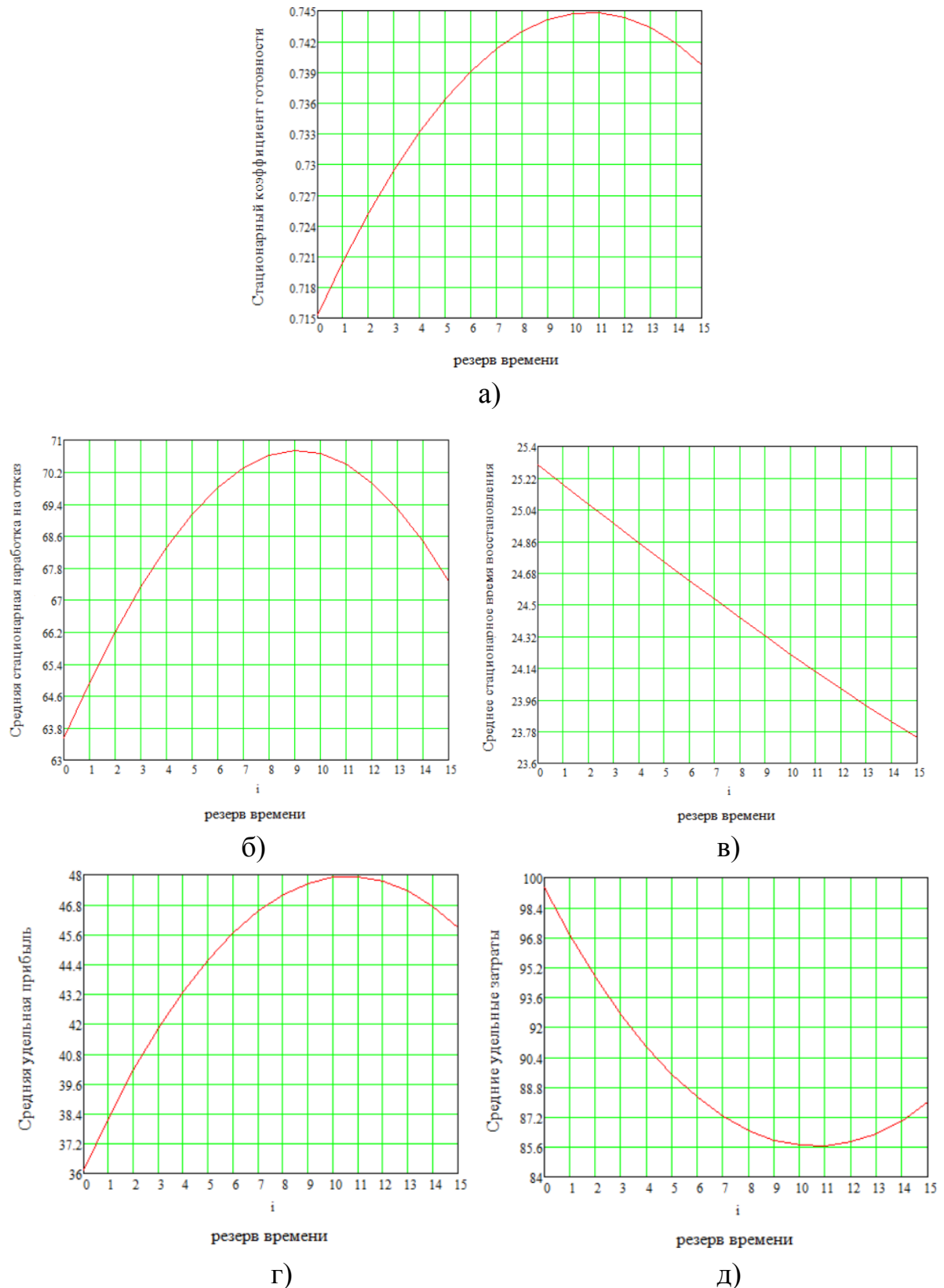


Рис.3 – Характеристики надежности и эффективности

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при заданном сочетании величин резерва времени наиболее оптимальными являются значения при $i=10$ и $i=11$ (выделены жирным в Таблице 2).

Отметим, что при должной технологической переформулировке математической задачи, рассмотренной в данной работе, ее результаты можно использовать для анализа надежности и эффективности системы газопровода с подземными хранилищами газа, системы водоснабжения с резервуарами на каждом участке, информационной системы с поэлементными хранилищами данных, систем электроэнергетики с поэлементными накопителями энергии.

Результаты работы могут быть использованы для определения оптимальной величины резерва времени, расчетов характеристик надежности и эффективности трубопроводных систем.

В дальнейшем планируется построение полумарковских моделей с общим фазовым пространством состояний и анализ функционирования систем трубопроводов с различными видами и стратегиями использования резерва времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 18-01-00392а).

Библиографический список

1. Королук В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – К.: Наук. Думка, 1982. – 236 с.
2. Ushakov I.A. Probabilistic Reliability Models. – Wiley, 2012. – 244 p.
3. Beichelt, F., Tittmann, P. Reliability and Maintenance: Networks and System // F. Beichelt, P. Tittmann. – New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 344 p.
4. Каштанов, В.А., Медведев, А.И. Теория надежности сложных систем / В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – 2-е изд., перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 608 с.
5. Grabski, F. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance // F. Grabski. – Gdynia, Poland, Elsevier Science, 2014. 270 p.
6. Obzherin, Y.E., Boyko, E.G. Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures // Y.E. Obzherin, E.G. Boyko. – London, Elsevier Academic Press, 2015, 212 p.
7. Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью. – Москва: Сов. Радио, 1974. – 296 с.
8. Креденцер Б.П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью. – Киев: Наук. Думка, 1978. – 240 с.
9. Копп, В.Я., Обжерин, Ю.Е., Песчанский, А.И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. – 284 с.
10. Obzherin, Yu.E., Sidorov, S.M., Nikitin, M.M. Semi-Markov model of a

multi-component energy system with component-wise storages // E3S Web of Conferences, Vol. 139, 2019. Art. No. 01065.

11. Руденко, Ю.Н., Ушаков, И.А. Надежность систем энергетики / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков. – 2-е изд. перераб. и доп.– Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 328 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem. – K.: Nauk. Dumka, 1982. – 236 s.
2. Ushakov I.A. Probabilistic Reliability Models. – Wiley, 2012. – 244 p.
3. Beichelt, F., Tittmann, P. Reliability and Maintenance: Networks and System // F. Beichelt, P. Tittmann. – New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 344 p.
4. Kashtanov, V.A., Medvedev, A.I. Teoriya nadezhnosti slozhnyh sistem / V.A. Kashtanov, A.I. Medvedev. – 2-e izd., pererab. – M.: FIZMATLIT, 2010. – 608 s.
5. Grabski, F. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance // F. Grabski. – Gdynia, Poland, Elsevier Science, 2014. 270 p.
6. Obzherin, Y.E., Boyko, E.G. Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures // Y.E. Obzherin, E.G. Boyko. – London, Elsevier Academic Press, 2015, 212 r.
7. CHERkesov G.N. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem s vremennoj izbytochnost'yu. – Moskva: Sov. Radio, 1974. – 296 s.
8. Kredencer B.P. Prognozirovanie nadezhnosti sistem s vremennoj izbytochnost'yu. – Kiev: Nauk. Dumka, 1978. – 240 s.
9. Kopp, V.YA., Obzherin, YU.E., Peschanskij, A.I. Stokhasticheskie modeli avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s vremennym rezervirovaniem / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. – Sevastopol': Izd-vo SevGTU, 2000. – 284 s.
10. Obzherin, Yu.E., Sidorov, S.M., Nikitin, M.M. Semi-Markov model of a multi-component energy system with component-wise storages // E3S Web of Conferences, Vol. 139, 2019. Art. No. 01065.
11. Rudenko, YU.N., Ushakov, I.A. Nadezhnost' sistem energetiki / YU.N. Rudenko, I.A. Ushakov. – 2-e izd. pererab. i dop.– Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1989. – 328 s.

¹*Сидоров Станислав Михайлович, старший преподаватель, haevec@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

²*Обжерин Юрий Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., objsev@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

³Никитин Михаил Михайлович, преподаватель,
m.nikitin.1979@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

*ANALYSIS OF RELIABILITY AND EFFICIENCY OF THE OIL
PIPELINE WITH STORAGE TANKS*

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

A modern technical system, consisting of many components, must be highly reliable, which ensures the relevance of the task of increasing the reliability and efficiency of its operation. One method of solving this problem is temporary redundancy. This paper analyzes the influence of an instantly replenished time reserve on reliability and efficiency characteristics of a single-line oil pipeline with storage tanks. The mathematical model of the system is a semi-Markov model with a common phase space of states of a multicomponent system with an element-wise time reserve, built by the authors in [10].

Key words: semi-Markov process, time reserve, pipeline systems, storage tank, reliability and efficiency characteristics.

Sidorov Stanislav M., senior lecturer, xaevec@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ КАЛЕНДАРНОЙ ПРОФИЛАКТИКИ

Копп В.Я.¹, Флоря П.Н.², Заморёнов М.В.³

Аннотация. Проводится анализ однокомпонентной системы, рассматривается ее функционирование при использовании стратегии календарной профилактики с отключением рабочего элемента на период профилактики. Проводится укрупнение системы с непрерывным фазовым пространством состояний. При использовании метода траекторий определяются функции распределения времен пребывания системы в подмножествах работоспособных и неработоспособных состояний. Результаты моделирования сравниваются с данными, полученными с использованием теоремы о среднестатистическом времени пребывания системы в подмножестве состояний.

Ключевые слова. Полумарковская система, алгоритм фазового укрупнения, функция распределения, метод траекторий.

При эксплуатации любого оборудования одним из важнейших показателей является его срок службы, который может быть значительно увеличен за счет рациональной стратегии технического обслуживания данного оборудования [1, 2, 3]. Известны случаи, когда незначительные неисправности второстепенных узлов оборудования, которые могли быть ликвидированы за короткое время, приводили к выводу из строя основного оборудования, влекущему за собой довольно сложные ремонтные работы. Для решения данной задачи возможны различные подходы к планированию проведения профилактического технического обслуживания.

Стратегия технического обслуживания, при которой реализуется календарная профилактика, предполагает выбор оптимальных сроков ее проведения, на основе предварительно построенной математической модели [4 – 10], позволяющей производить оценку производительности оборудования с учетом профилактики.

В данной статье предлагается рассмотреть процесс функционирования однокомпонентной системы с учетом календарной профилактики. В частности, в качестве такой системы может быть рассмотрен производственный модуль, основой которого является единица технологического оборудования, выполняющая одну из операций процесса селективной сборки изделий.

Рассмотрим функционирование такой системы. Время ее безотказной работы – СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P(\alpha_1 \leq t)$, время восстановления системы – СВ β_1 с ФР $G_1(t) = P(\beta_1 \leq t)$. В случайные моменты времени (через промежутки

времени α_2 с ФР $F_2(t) = P(\alpha_2 \leq t)$) проводится профилактика, время проведения профилактики – СВ β_2 с ФР $G_2(t) = P(\beta_2 \leq t)$. Профилактика проводится, если момент начала профилактики попал на период работы системы. После проведения профилактики работа системы начинается сначала (рабочие свойства системы полностью обновляются). СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания и дисперсии; у ФР $F_1(t), G_1(t), G_2(t)$ существуют плотности $f_1(t), g_1(t), g_2(t)$.

Для описания функционирования системы используем ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ и соответствующий ему ПМП $\xi(t)$. Физические состояния системы: 1 – системы исправна, 0 – системы восстанавливается, 2 – системы профилактируется. Расширим ФПС, введя полумарковские состояния:

$$E = \{221, 210, 102x, 112z, 200y\},$$

где 221 – началась профилактика, работа системы прервана; 210 – профилактика завершена, работа системы началась сначала; 102x – системы завершила работу, началось восстановление; время, оставшееся до проведения профилактики $x > 0$; 112z – произошло восстановление системы; время, оставшееся до проведения профилактики $z > 0$; 200y – профилактика не проводится, т.к. момент профилактики попал на момент восстановления системы; время, оставшееся до окончания восстановления $y > 0$.

Граф состояний системы приведен на **Рис.1**.

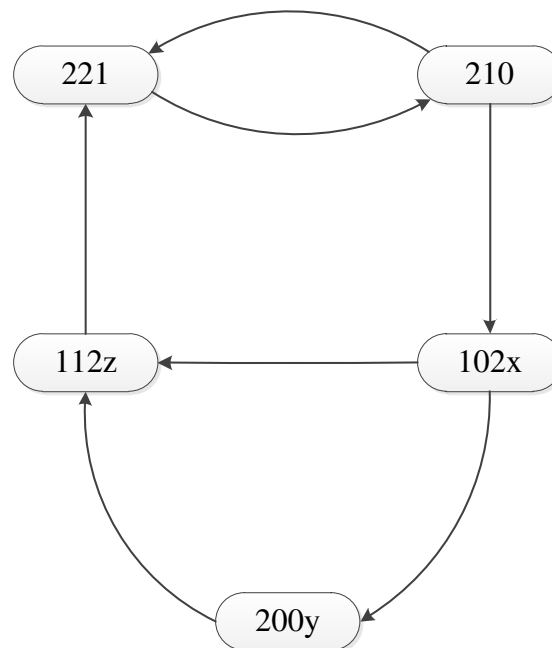


Рис.1 – Граф состояний системы

При построении полумарковской модели приняты следующие допущения:

- за время восстановления происходит не более одного события – начало профилактики;
- за время между профилактиками происходит не более 1 отказа.

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

$$E_+ = \{221, 210, 112z\},$$

$$E_- = \{200y, 102x\}.$$

Для достижения цели моделирования, а именно определения коэффициента готовности такой системы воспользуемся методом траекторий. Требуется произвести укрупнение системы, то есть перейти от системы с непрерывным фазовым пространством состояний к системе с дискретными состояниями.

В таком случае непрерывные компоненты будут равны:

$$x = [\alpha_2 - \alpha_1]^+;$$

$$y = [\beta_1 - x]^+;$$

$$z = P_{102}^{112}[x - \beta_1]^+ + P_{102}^{200}[y - \beta_1]^+.$$

Отсюда, функции распределения выше указанных величин по теоремам Королюка В.С. [6] и Заморёнова М.В. [11] будут равны:

$$\bar{F}_x(t) = \frac{\int_0^\infty [F_2(t+x) - F_2(x)]f_1(x)dy}{\int_0^\infty [1 - F_2(x)]f_1(x)dx},$$

$$\bar{F}_y(t) = \frac{\int_0^\infty [G_1(t+x) - G_1(x)]f_x(x)dy}{\int_0^\infty [1 - G_1(x)]f_x(x)dx},$$

$$\bar{F}_z(t) = P_{102}^{112} \frac{\int_0^\infty [F_x(t+x) - F_x(x)]g_1(x)dy}{\int_0^\infty [1 - F_x(x)]g_1(x)dx} + P_{102}^{200} \frac{\int_0^\infty [F_y(t+x) - F_y(x)]g_1(x)dy}{\int_0^\infty [1 - F_y(x)]g_1(x)dx}.$$

Для вычисления последней ФР определены вероятности переходов:

$$P_{221}^{210} = 1; P_{200}^{112} = 1; P_{112}^{221} = 1;$$

$$P_{210}^{221} = \int_0^\infty \bar{F}_2(t)f_1(t)dt;$$

$$P_{210}^{102} = \int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_2(t) dt ;$$

$$P_{102}^{112} = \int_0^{\infty} \bar{F}_x(t) g_1(t) dt ;$$

$$P_{102}^{200} = \int_0^{\infty} \bar{G}_1(t) f_x(t) dt .$$

Определив вероятности переходов, запишем времена пребывания системы в состояниях:

$$\begin{aligned} \theta_{221} &= \beta_2 , \\ \theta_{210} &= \alpha_1 \wedge \alpha_2 , \\ \theta_{112x} &= \alpha_1 \wedge x , \\ \theta_{200x} &= \alpha_2 \wedge x , \\ \theta_{102x} &= \beta_1 \wedge x , \end{aligned}$$

где $\wedge$ – знак минимума.

Найдем ФР времен пребывания системы в состояниях:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{221}(t) &= \bar{G}_2(t) , \\ \bar{F}_{210}(t) &= \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_2(t) , \\ \bar{F}_{112}(t) &= \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_x(t) , \\ \bar{F}_{200}(t) &= \bar{F}_2(t) \cdot \bar{F}_x(t) , \\ \bar{F}_{102}(t) &= \bar{G}_1(t) \cdot \bar{F}_x(t) . \end{aligned}$$

Для получения искоемых характеристик необходимо найти стационарное распределение вложенной цепи Маркова (ВЦМ). Для этого требуется составить и решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \rho_{221} = \rho_{210} \cdot P_{210}^{221} + \rho_{112}, \\ \rho_{210} = \rho_{221}, \\ \rho_{102} = \rho_{210} \cdot P_{210}^{102}, \\ \rho_{200} = \rho_{102} \cdot P_{102}^{200}, \\ \rho_{112} = \rho_{102} \cdot P_{102}^{112} + \rho_{200} \cdot P_{200}^{112}. \end{cases} \quad (1)$$

Для решения данной системы вместо одного из уравнений вводится уравнение нормировки:

$$\rho_{221} + \rho_{210} + \rho_{102} + \rho_{200} + \rho_{112} = 1.$$

Тогда система (1) примет вид:

$$\begin{cases} \rho_{221} + \rho_{210} + \rho_{102} + \rho_{200} + \rho_{122} = 1, \\ \rho_{210} = \rho_{221}, \\ \rho_{102} = \rho_{210} \cdot P_{210}^{102}, \\ \rho_{200} = \rho_{102} \cdot P_{102}^{200}, \\ \rho_{112} = \rho_{102} \cdot P_{102}^{112} + \rho_{200} \cdot P_{200}^{112}. \end{cases} \quad (2)$$

Произведем преобразования системы (2):

$$\begin{cases} \rho_{221} + \rho_{210} + \rho_{102} + \rho_{200} + \rho_{122} = 1, \\ \rho_{210} = \rho_{221}, \\ \rho_{102} = \rho_{221} \cdot P_{210}^{102}, \\ \rho_{200} = \rho_{221} \cdot P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200}, \\ \rho_{112} = \rho_{221} \cdot P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{112} + \rho_{221} \cdot P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112}. \end{cases}$$

Отсюда следует:

$$\begin{aligned} & \rho_{221} + \rho_{221} + \rho_{221} \cdot P_{210}^{102} + \rho_{221} \cdot P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} + \\ & + \rho_{221} \cdot P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{112} + \rho_{221} \cdot P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112} = 1 \end{aligned}$$

Упростим выражение:

$$\rho_{221} \cdot (2 + 2 \cdot P_{210}^{102} + P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112}) = 1$$

Из системы (2) получим:

$$\begin{cases} \rho_{221} = \frac{1}{2 + 2 \cdot P_{210}^{102} + P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112}}, \\ \rho_{210} = \frac{1}{2 + 2 \cdot P_{210}^{102} + P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112}}, \\ \rho_{102} = \frac{P_{210}^{102}}{2 + 2 \cdot P_{210}^{102} + P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112}}, \\ \rho_{200} = \frac{P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200}}{2 + 2 \cdot P_{210}^{102} + P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112}}, \\ \rho_{112} = \frac{P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{112} + P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112}}{2 + 2 \cdot P_{210}^{102} + P_{210}^{102} \cdot P_{102}^{200} \cdot P_{200}^{112}}. \end{cases}$$

Для определения функций распределения времен пребывания системы в подмножествах E_+ и E_- воспользуемся методом траекторий [12].

Используя теорему о ФР времен пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий, определяем ФР $F_{221}^\theta(t)$ и $F_{210}^\theta(t)$ времен

пребывания в состояниях 221 и 210 с учетом повторных попаданий в них за время пребывания в подмножестве E_+ :

$$F_{221}^{\theta}(s) = \frac{F_{221}(s)}{c_{221} - (c_{221} - 1)f_{221}(s)};$$

$$F_{210}^{\theta}(s) = \frac{F_{210}(s)}{c_{210} - (c_{210} - 1)f_{210}(s)},$$

где

$$c_{221} = \frac{m_{221}^{\theta}}{P_{221} \cdot m_{221}}, \quad c_{210} = \frac{m_{210}^{\theta}}{P_{210} \cdot m_{210}}.$$

Выделим траектории и, в соответствии с теоремой о полной вероятности, определим вероятности P_k^T реализации каждой из траекторий, на основании переходных вероятностей вложенной цепи Маркова:

$$T_1 = \{112, 221, 210\};$$

$$P_1^T = 1.$$

Определяются ФР времен пребывания системы в траекториях:

$$F_1^T = F_{112} * F_{221}^{\theta} * F_{210}^{\theta}.$$

Т.к. траектория всего одна, то искомая ФР времени пребывания системы в подмножестве E_+ вне зависимости от начального состояния равна:

$$F_{\Sigma} = F_{112} * F_{221}^{\theta} * F_{210}^{\theta}.$$

Рассмотрим пример моделирования такой системы с известными параметрами распределения случайных величин.

Исходными данными для моделирования служат функции распределения $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$ и $G_2(t)$; которым соответствует обобщенный закон Эрланга второго порядка с параметрами $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2; \nu_1, \nu_2; \gamma_1, \gamma_2$ соответственно; причем

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

где $\lambda_1 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 0,200 \text{ ч}^{-1}$;

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

где $\mu_1 = 0,1333 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_2 = 0,400 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_1(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1},$$

где $\nu_1 = 6,667 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_2 = 20,0 \text{ ч}^{-1}$;

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

где $\gamma_1 = 2,667 \text{ ч}^{-1}$, $\gamma_2 = 8,00 \text{ ч}^{-1}$.

На **Рис.2** приведена искомая $F_\Sigma(t)$ функция распределения, полученная в данной работе.

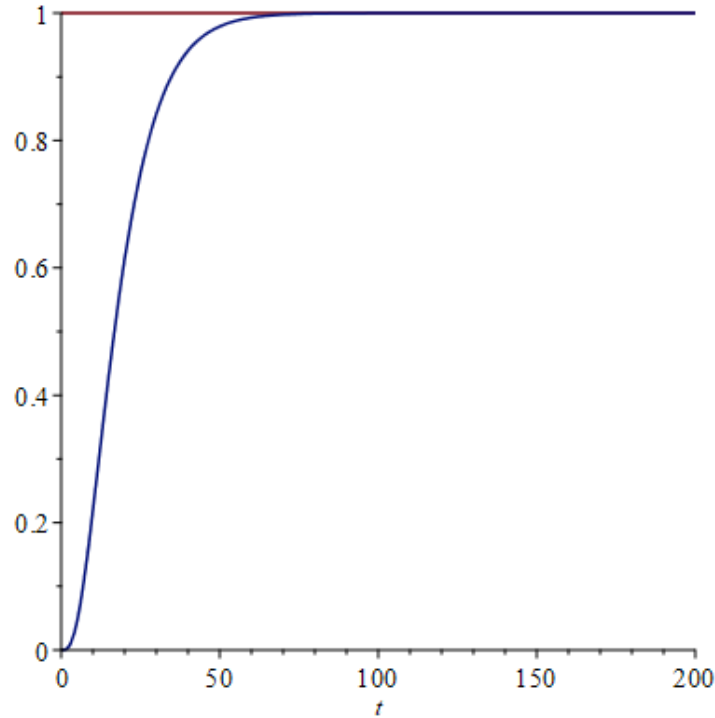


Рис.2 – Вид ФР времени пребывания системы в подмножестве E_+

Сравним значения математического ожидания полученной нами функции и математического ожидания, определяемого с помощью известного выражения:

$$T_+ = \frac{\sum_{i \in E_+} m_i \rho_i}{\sum_{k \in K \subset E_+} \sum_{j \in E_-} P_{kj} \rho_i}. \quad (3)$$

Математическое ожидание полученной нами функции распределения составляет

$$19.2182202963 \text{ ч},$$

тогда как, определяемое с помощью выражения (3) –

$$19.2182202963 \text{ ч}.$$

Нетрудно констатировать, что математические ожидания совпадают.

Проведенное сравнение математических ожиданий времен пребывания в подмножестве работоспособных состояний, полученных на основании найденной в работе функции распределения и на основании

теоремы о среднем стационарном времени пребывания полумарковского процесса в подмножестве состояний, показало правильность полученных результатов.

В дальнейших исследованиях планируется применение метода для моделирования более сложных технического обслуживания в автоматизированном производстве, а также применение построенной модели при оптимизации времен проведения профилактик в исследуемых системах.

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

Библиографический список

1. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., – 1982. – 231 с.
3. Глеч С.Г. Определение оптимальных моментов профилактики технологической ячейки с мгновенно пополняемым резервом времени // Сборник научных трудов СИЯЭиП. – Севастополь: СИЯЭиП, 2001. – Вып.5. – с. 187 – 193.
4. Корольук В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.
5. Корольук В.С. Стохастические модели систем. Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: Наукова думка, 1989. 208 с.
6. Корольук В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления / В.С. Корольук // – Кибернетика. – 1981. №4. – С. 121 – 124.
7. Корольук В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Корольук, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1976. – 181 с.
8. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.
9. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
10. 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.
11. Заморёнов М.В., Копп В.Я., Заморёнова Д.В. Метод моделирования регенерирующих систем. Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 6. С. 134-144.
12. В.Я. Копп. Использование метода траекторий для построения полумарковской модели структуры «технологическая ячейка – накопитель». В.Я. Копп, М.В. Заморёнов, Ю.Е. Обжерин, М.Ю. Ларин //

Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика.
Телекоммуникации. Управление №3(247). Санкт-Петербург:
Издательство Политехнического университета, 2016. с. 23-34

Bibliograficheskij spisok

1. Bajhel't F., Franken P. Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskij podhod. Per. s nem. M.: Radio i svyaz', 1988. 392 s.
2. Barzilovich E.YU. Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnyh sistem: Ucheb. posobie dlya vuzov. – M.: Vyssh. shk., – 1982. – 231 s.
3. Glech S.G. Opredelenie optimal'nyh momentov profilaktiki tekhnologicheskoy yachejki s mgnovenno popolnyaemym rezervom vremeni // Sbornik nauchnyh trudov SIYAEiP. – Sevastopol': SIYAEiP, 2001. – Vyp.5. – s. 187 – 193.
4. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem. Kiev: Naukova dumka, 1982. 236 s.
5. Korolyuk V.S. Stohasticheskie modeli sistem. Otv. red. A.F. Turbin. Kiev: Naukova dumka, 1989. 208 s.
6. Korolyuk V.S. Superpoziciya processov markovskogo vosstanovleniya / V.S. Korolyuk // – Kibernetika. – 1981. №4. – S. 121 – 124.
7. Korolyuk V.S. Polumarkovskie processy i ih prilozheniya / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: Nauk. Dumka, 1976. – 181 s.
8. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.
9. Rajnshke K., Ushakov I.A. Ocenka nadezhnosti sistem s ispol'zovaniem grafov. M.: Radio i svyaz', 1988. 208 s.
10. 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.
11. Zamoryonov M.V., Kopp V.YA., Zamoryonova D.V. Metod modelirovaniya regeneriruyushchih sistem. Matematicheskoe modelirovanie. 2018. T. 30. № 6. S. 134-144.
12. V.YA. Kopp. Ispol'zovanie metoda traektorij dlya postroeniya polumarkovskoj modeli struktury «tekhnologicheskaya yachejka – nakopitel'». V.YA. Kopp, M.V. Zamoryonov, YU.E. Obzherin, M.YU. Larin // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie №3(247). Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2016. s. 23-34

¹*Копп Вадим Яковлевич, д-р техн. наук, проф., v_kopp@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

²Флоря Павел Николаевич, gydra@bk.ru, Россия, Севастополь, директор Федерального государственного унитарного предприятия «13 судоремонтный завод Черноморского флота» Министерства обороны Российской Федерации,

³Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доц., Zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

*STUDY OF FUNCTIONING OF A SINGLE-COMPONENT SYSTEM
TAKING INTO ACCOUNT CALENDAR PREVENTION*

V.Y.Kopp, P.N. Florya, M.V. Zamoryonov

The article analyzes a one-component system. Its functioning is considered when using the calendar prevention strategy with the shutdown of the working element for the period of prevention. The enlargement of the system with a continuous phase space of states is carried out. When using the trajectory method, the distribution functions of the sojourn times of the system in subsets of healthy and inoperable states are determined. The simulation results are compared with the data obtained using the theorem on the average time spent by the system in a subset of states.

Keywords: semi-Markov system, phase consolidation algorithm, distribution function, trajectory method.

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

Florya Pavel Nikolaevich, gydra@bk.ru, Russia, Sevastopol, director Federal state unitary enterprise "13 ship repair plant of the black sea fleet" of the Ministry of defense of the Russian Federation

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

ПРИНЦИП ТИПИЗАЦИИ УЧАСТКОВ ЭШЕЛОНИРОВАННОГО ДЕГРАДАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Доронина Ю.В.¹

Аннотация. При создании и оптимизации функционирования производственных систем различного назначения целесообразно производить классификацию эволюционных периодов в рамках подхода, основанного на эшелонировании их деградационных процессов. Это позволит, применяя созданные паттерны участков эшелонов, проводить оценку типовых процессов, что сократит время на исследование, например, в случаях ответственного и оперативного применения производственных систем. Результаты моделирования эшелонированных деградационных процессов производственной системы показали применимость этого подхода для создания системы поддержки принятия решений по формированию планов ремонтно-профилактических работ таких систем.

Ключевые слова. Производственная система, деградация, эшелонированный процесс, анализ эффективности, паттерн, моделирование.

При исследовании эффективности производственных систем ответственного применения (ПСОП) часто используют типовые схемы моделирования, что при значительном разнообразии прикладных областей и особенностей таких систем, приводит к некоторому, не всегда обоснованному упрощению (или обобщению) результатов анализа. Характерное для ПСОП требование к качеству самого процесса моделирования, особенно, если это касается исследования деградационных процессов, приводит к актуальной задаче развития подходов к классификации, что позволит на основе применения паттернов эшелонов, проводить оценку типовых процессов, без увеличения времени исследования.

Эффективность производственных систем ответственного применения часто связывают с производительностью машин и автоматизированных линий, которая представляет собой количество годной продукции, выдаваемой в единицу времени [1-3]. Способы определения различных показателей производительности (цикловой или теоретической) производительности, технической производительности, фактической производительности приведены в работах [4,5].

Изменение показателя эффективности ПСОП в связи с началом деградационных процессов во времени $E(t)$ представимо в виде:

$$E_d(t) = \begin{cases} E_0 \cdot F(t, \alpha) & | t \geq t_r^* \\ E_0 \cdot r(t, \beta) & | t \leq t_r^* \end{cases}, \quad (1)$$

где E_0 – значение интегрального показателя эффективности (ИПЭ) ПСОП до начала деградационных процессов; $F(t, \alpha)$ – функция, определяющая вид деградационного процесса; α – случайная функция, описывающая влияние неопределённости условий функционирования на деградационного процесса; параметр определяет случайную ; $r(t, \beta)$ – функция, определяющая вид процесса реинжиниринга; β – случайная функция, описывающая влияние неопределённости условий функционирования на процесс реинжиниринга; t_r^* – время начала реинжиниринга системы. Типовой процесс изменения ИПЭ имеет несколько участков: на первом $E(t) = const$ – это тот период функционирования, когда эффективность таких систем мало отклоняется (или слабо падает) от значения ее ИПЭ до начала деградационных процессов. На отрезке $t \geq t_m$ ИПЭ падает и определяется в общем случае как $E_0 \cdot F(t, \alpha)$. Третий отрезок характеризует период реинжиниринга (E_r), который повышает ИПЭ в % по отношению к исходной эффективности с некоторым коэффициентом эффективности реинжиниринга и определяемый (1).

В представленной постановке не учитывается то, что сам процесс деградации имеет некоторые периоды, значительно отличающиеся друг от друга, например, период скрытых деградационных процессов, не влияющих на общее функционирование; период интенсивной деградации и т.п. Моделирование таких периодов в общем деградационном процессе должно вестись по различным паттернам.

Цель статьи – предложить подход к статистическому моделированию устаревания ПСОП на основе принципа эшелонирования деградационных процессов.

Понятие *эшелонности* применяется М. Месаровичем при описании иерархической структуры сложных систем следующим образом: система представляется в виде относительно независимых, взаимодействующих между собой подсистем, которые могут иметь права принятия решений [4]. Основной отличительной особенностью многоэшелонной структуры является предоставление подсистемам всех уровней определенной свободы в выборе их собственных решений, причем эти решения могут отличаться от тех, которые бы выбрал вышестоящий уровень. Подсистемам предоставляется определенная свобода в выборе целей, в связи с чем, многоэшелонные структуры называют также *многоцелевыми* [4].

Под эшелонированием деградационных процессов ПСОП предлагается понимать выделение паттернов стационарности на эволюционных графиках, что позволит получить классификационные

признаки паттернов и осуществлять в дальнейшем моделирование и предсказание эволюции с учетом дефицита временного ресурса.

Деградация в общем случае представляет собой нестационарный процесс снижения эффективности (1), **Рис.1**.

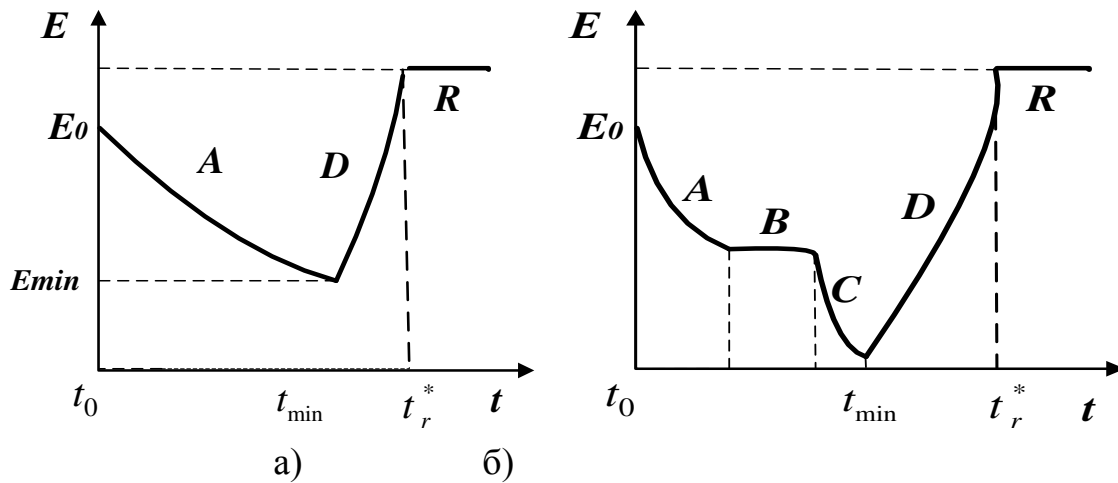


Рис.1 – Схема процесса деградации ПСОП: а) для участков А, D с экспоненциальным законом распределения случайного процесса, б) для смешанного нестационарного процесса (участки А, С, D) и стационарным участком В

На участке А (**Рис.1**) эффективность снижается экспоненциально вследствие того, что может значительно снизиться эффективность отдельной подсистемы. Например, сбой в программном обеспечении приведет к увеличению доступа времени к базе данных (БД) параметров детали, что приведет к снижению показателя эффективности систем в целом. Однако понижение эффективности будет временным и может находиться в пределах некоторого допустимого среднего значения эффективности (участок В). На участке С (интенсивное старение) эффективность ПСОП резко падает, например, вследствие пиковой нагрузки или поломки отдельных подсистем. Деградация, достигшая на участке С критической отметки, вследствие падения эффективности, – на участке D повышается в рамках модернизации (или реинжиниринга) системы (участок R). Таким образом, с учетом приведенных на **Рис.1** схем, можно выделить некоторые типовые участки графика, характеризующего нестационарный режим деградационных процессов, **Рис.2**.

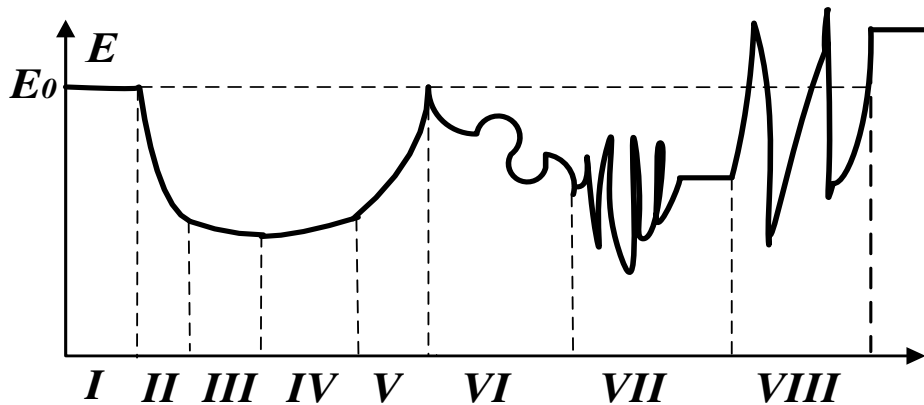


Рис.2 – Схема типовых паттернов эшелонированного процесса деградации ПСОП: I – стационарный, II- интенсивное снижение, III- медленное снижение, IV – медленный рост, V – интенсивный рост, VI – изменчивое снижение, VII- хаотический процесс с выходом на стационарное плато, VIII – интенсивные скачки в окрестности E_0 с выходом на плато реинжиниринга

Приведенная на **Рис.2** схема типовых элементов эшелонированного процесса деградации (ЭДП) ПСОП содержит восемь основных паттернов, которые могут быть применены к описанию эволюции производственных систем. Например, паттерн III характерен для описания первого этапа процессов старения производственных систем вследствие естественных причин; паттерн V представляет интенсивное совершенствование, а паттерн VIII – процесс настройки или адаптации нового оборудования.

Процесс эволюции представим в виде:

$$Y_T = \langle X_T, T, \xi_{X_T}, \gamma_{Y_T} \rangle, \quad (2)$$

где X_T, Y_T, T – вектор входных воздействий, вектор результата и период времени функционирования системы для получения этого результата соответственно, $T = t_i t_j$; ξ_{X_T} – функция, описывающая убывание эффективности вследствие естественных причин деградации ПСОП (старение, коррозия, износ, усталость), отражающая их влияние на эволюционный процесс в целом; γ_{Y_T} – функция, описывающая убывание эффективности вследствие других причин деградации.

Представляя (2), как предложено в [6], для интервала $t_0 t_1 = t_0 t \cup t t_1$, где t_0, t_1 – начальная и конечная точки отсчета времени и $z(t_1) = H(t_0 t_1, z(t_0), X_{t_0 t})$ – уравнение состояния системы в момент времени t_1 , H – оператор перехода, $X_{t_0 t}$ – входной процесс, то уравнение выхода системы записывается подстановкой с учетом деградационных процессов ξ_{X_T}, γ_{Y_T} и $y(t_1) = G(t t_1, z(t), X_{t t_1}, \xi_{X_{t t_1}}, \gamma_{Y_{t t_1}})$, $z(t) = H(t_0 t, z(t_0), X_{t_0 t}, \xi_{X_{t_0 t}}, \gamma_{Y_{t_0 t}})$:

$$\begin{aligned} y(t_1) &= G(tt_1, z(t), X_{tt_1}, \xi_{X_{tt_1}}, \gamma_{Y_{tt_1}}) = G(t_0t_1, z(t_0), X_{t_0t_1}, \xi_{X_{t_0t_1}}, \gamma_{Y_{t_0t_1}}) = \\ &= G(tt_1, H(t_0t, z(t_0), X_{t_0t}, \xi_{X_{t_0t}}, \gamma_{Y_{t_0t}}), X_{tt_1}, \xi_{X_{tt_1}}, \gamma_{Y_{tt_1}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где G – оператор выходов, $z(t_0)$ – совокупность внутренних свойств ПСОП в момент времени t_0 ; $\xi_{X_{t_0t_1}}$ и $\xi_{X_{tt_1}}$ – процессы деградации от естественных процессов на участках t_0t_1 и tt_1 соответственно; $\gamma_{Y_{t_0t_1}}$ и $\gamma_{Y_{tt_1}}$ – процессы деградации от других процессов на участках t_0t_1 и tt_1 соответственно.

Для прогнозирования ожидаемой эффективности ПСОП с учетом паттернов ЭДП необходимо учитывать их параметры, тогда (3) пример вид:

$$I: \xi_{X_{t_0t_1}}, \gamma_{Y_{t_0t_1}}, \xi_{X_{tt_1}}, \gamma_{Y_{tt_1}} = 0. \quad (4)$$

$$II: \xi_{X_{t_0t_1}} = \alpha E_0 e^{-k(t_j - t_0)}, t_j \in t_0t_1; \gamma_{Y_{t_0t_1}} = \beta E_0 e^{-\eta(t_i - t_0)}, t_i \in t_0t_1, 1 < k, \eta \gg 0, \quad (5)$$

где α, β – коэффициенты, отражающие особенности деградации оборудования в особых условиях функционирования или особенности внешней среды;

$$III: \xi_{X_{t_0t_1}} = \alpha E_0 e^{-k(t_j - t_0)}, t_j \in t_0t_1; \gamma_{Y_{t_0t_1}} = \beta E_0 e^{-\eta(t_i - t_0)}, t_i \in t_0t_1, 1 \ll k, \eta > 0; \quad (6)$$

$$IV: \xi_{X_{t_0t_1}} = \alpha E_0 e^{k(t_j - t_0)}, t_j \in t_0t_1; \gamma_{Y_{t_0t_1}} = \beta E_0 e^{\eta(t_i - t_0)}, t_i \in t_0t_1, 1 \ll k, \eta > 0; \quad (7)$$

$$V: \xi_{X_{t_0t_1}} = \alpha E_0 e^{k(t_j - t_0)}, t_j \in t_0t_1; \gamma_{Y_{t_0t_1}} = \beta E_0 e^{\eta(t_i - t_0)}, t_i \in t_0t_1, 1 < k, \eta \gg 0; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} VI: \tilde{\xi}_{X_{t_0t_1}} &= (\max \xi_{X_{t_0t_1}} - \min \xi_{X_{t_0t_1}}) | \max \xi_{X_{t_0t_1}}, \min \xi_{X_{t_0t_1}}; \\ \tilde{\gamma}_{Y_{t_0t_1}} &= (\max \gamma_{Y_{t_0t_1}} - \min \gamma_{Y_{t_0t_1}}) | \max \gamma_{Y_{t_0t_1}}, \min \gamma_{Y_{t_0t_1}}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$VII: \tilde{\xi}_{X_{t_0t_1}} = \frac{\sum \xi_{nX_{t_0t_1}}}{n}, \tilde{\gamma}_{Y_{t_0t_1}} = \frac{\sum \gamma_{mY_{t_0t_1}}}{m}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} VIII: \tilde{\xi}_{X_{t_0t_1}} &= r(\max \xi_{X_{t_0t_1}} - \min \xi_{X_{t_0t_1}}), \max \xi_{X_{t_0t_1}} \leq \delta, 0 \ll r \leq 1; \\ \tilde{\gamma}_{Y_{t_0t_1}} &= r(\max \gamma_{Y_{t_0t_1}} - \min \gamma_{Y_{t_0t_1}}), \max \gamma_{Y_{t_0t_1}} \leq \varepsilon, \end{aligned} \quad (11)$$

где ε, δ – значения допустимых (заданных ЛПР) пределов скачков и падений эффективности для деградационных процессов $\gamma_{Y_{t_0t_1}}$ и $\xi_{X_{t_0t_1}}$ соответственно.

Экспоненциальные распределения, предложенные в (5) – (8) являются условным обобщением паттернов эшелонированных процессов такого типа, но по решению ЛПР, возможно применение распределений других видов.

Применение оценок (4) – (11) позволит оценивать состояние эволюции, находящейся в развитии процесса, если его возможно классифицировать, либо определить на основании аналогов.

В таблице 1 приведены результаты моделирования и прогнозирования эффективности ПСОП без учета принципа ЭДП процесса на различных временных интервалах в следующих предположениях: закон устаревания – экспоненциальный, коэффициент интенсивности устаревания 0.5; время

начала устаревания – 2.5 мес.; коэффициент с усиленным совершенствованием 0.3[7-8].

Таблица 1 – Результаты прогнозирования эффективности ПСОП

№	t		$T = t_i t_j$	$T = t_k t_l$	Интенсивность устаревания, k	Эффективность, $E_s'(t)$	Средняя эффективность
1	t_i	3.60	1.40	-	0.50	2.25	0.94
	t_j	5.00				0.75	
	t_k	4.20	-	2.32	0.50	3.00	
	t_l	6.52				1.50	
2	t_i	3.60	1.40	-	0.30	3.00	2.25
	t_j	5.00				1.50	
	t_k	4.20	-	2.32	0.50	3.00	
	t_l	6.52				1.50	

При изменении коэффициента устаревания (коэффициента интенсивности совершенствования) во втором опыте изменились значения $E_s'(t)$ на концах отрезка времени $T = t_i t_j$. С точки зрения начала реинжиниринга (интенсивного единовременного подъема эффективности): при ограничении на показатель эффективности системы 1.5 – время требуемого начала реинжиниринга изменилось с 5 мес. до 6.52 мес.; при ограничении в 3 единицы – с 3.6 мес. до 4.2 мес.

В таблица 2 с учетом значений из таблицы 1 (только для экспоненциального интенсивного падения эффективности), приведены результаты моделирования эволюции ПСОП при тех же условиях, но для различных паттернов ЭДП.

Таблица 2 – Результаты моделирования эшелонированных деградационных процессов ПСОП

№	Описание процесса	Паттерн ЭДП	Оценка (расчетное значение)	Оценка эффективности в точке без применения принципа ЭДП
1	Функционирование сразу после ввода в эксплуатацию	I	E ₀	E ₀
2	Начало устаревания (или компонент ПСОП)	II	0.94; 0.94	2.25-1.50
3	Установление режима устаревания, замедление вследствие учащения профилактик оборудования	III	2.25; 2.25	3.00-1.50
4	Установление режима медленного совершенствования	IV	2.3; 2.4	1.50-3.00
5	Изменчивое снижение	VI	1.05 max 1.99; 0.75 min 0.66	2.25-1.50
6	Деградация неясной динамики (хаотический процесс)	VII	0.9	2.25-1.50
7	Настройка нового оборудования	VIII	2.7 → 4.4	-

Анализ результатов моделирования (таблица 2) показал, что без применения паттернов ЭДП ЛПР основывается на простейших выводах (таблица 1), но в более сложных случаях, целесообразно использовать принцип ЭДП, проведя более детальную классификацию деградационных процессов.

Дальнейшие исследования связаны с моделированием остальных паттернов эшелонированного процесса деградации ПСОП, что позволит уточнить прогноз эволюции сложных производственных систем ответственного применения.

Библиографический список

1. Копп В.Я. Моделирование переналаживаемых автоматизированных производственных систем / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский, Чуб О.П. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. — 232 с.
2. Автоматические линии в машиностроении: Справочник / Л.И. Волчкевич, В.В. Губанов, А.И. Дашенко. – Т.1. Этапы проектирования и расчет; Под ред. Л.И.Волчкевича – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
3. Лытнева Н.А., Парушина Н.В., Федотов А.М. Современные подходы к анализу эффективности производства продукции в управлении промышленным предприятием // Научный результат. Экономические исследования. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-podhody-k-analizu->

effektivnosti-proizvodstva-produktsii-v-upravlenii-promyshlennym-predpriyatiem (дата обращения: 18.11.2020).

4. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем [Текст]: Пер. с англ. / М. Месарович, Д. Мако и И. Такахара; Под ред. И. Ф. Шахнова; Предисл. чл.-кор. АН СССР Г. С. Поспелова. – Москва: Мир, 1973. — 344 с.
5. Портнягин Н.Н., Пюкке Г.А., Горева Т.И. Построение моделей деградации систем на основе Байесовского оценивания параметров составляющих компонент// Научный электронный архив. URL: <http://econf.rae.ru/article/5626> (дата обращения: 18.11.2020).
6. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 199 с.
7. Доронина Ю.В. Моделирование изменчивости взаимосвязей элементов в сложной технической системе Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2019.– №2(6). С. 26-33.
8. Доронина Ю.В. Модель эффективности информационной системы с учетом деградационных процессов. Научно-методический журнал «Информатизация образования и науки». – № 4(44)/ 2019 г. – С.80-94.

Bibliograficheskiy spisok

1. Kopp V. Ya. Modeling of reconfigurable automated production systems / V. Ya. Kopp, Yu. E. Obzherin, A. I. Peschansky, Chub O. P.-Sevastopol: SevNTU publishing House, 2007. - 232 p.
2. Automatic lines in mechanical engineering: Handbook / L. I. Volchkevich, V. V. Gubanov, A. I. dashchenko. - T. 1. Stages of design and calculation; edited by L. I. Volchkevich-M.: mechanical engineering, 1984 — - 312 p.
3. Lytneva N. A., Parushina N. V., Fedotov a.m. Modern approaches to the analysis of production efficiency in industrial enterprise management // Scientific result. Economic study. 2017. # 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-k-analizu-effektivnosti-proizvodstva-produktsii-v-upravlenii-promyshlennym-predpriyatiem> (accessed: 18.11.2020).
4. Mesarovich M. Theory of hierarchical multi-level systems [Text]: TRANS. from English / M. Mesarovich, D. Mako and I. Takahara; ed. By I. F. Shakhnov; Preface by CHL. - cor. Academy of Sciences of the USSR G. S. Pospelova. - Moscow: Mir, 1973. - 344 p.
5. Portnyagin N. N., Pyukke G. A., Goreva T. I. Building models of system degradation based on Bayesian estimation of component parameters// Scientific electronic archive. URL: <http://econf.rae.ru/article/5626> (accessed: 18.11.2020).
6. Nikolaev V. I., brook V. M. system Engineering: methods and applications. - L.: mechanical engineering, leningr. otd-nie, 1985. - 199 p.

7. Doronina Yu. V. Modeling the variability of element relationships in a complex technical system automation and measurement in machine and instrument engineering. 2019. - No. 2 (6). Pp. 26-33.
8. Doronina Yu. V. Model of information system efficiency taking into account degradation processes. Scientific and methodological journal "Informatization of education and science". - No. 4 (44)/ 2019-Pp. 80-94.

¹Доронина Юлия Валентиновна, д-р техн. наук, доц., проф.,
YVDoronina@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

THE PRINCIPLE OF TYPING SECTIONS OF THE LAYERED DEGRADATION PROCESS OF THE PRODUCTION SYSTEM

Yu.V. Doronina

When creating and optimizing the functioning of production systems for various purposes, it is advisable to classify evolutionary periods within the framework of an approach based on the separation of their degradation processes. This will allow you to use the created patterns of echelon sections to evaluate typical processes, which will reduce the time for research, for example, in cases of responsible and operational use of production systems. The results of statistical modeling of layered degradation processes of the production system showed the applicability of this approach for creating a decision support system for the formation of repair and maintenance plans for such systems.

Keyword: *production system, degradation, layered process, efficiency analysis, pattern, modeling.*

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

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РЕВЕРСИОННО КОНСТРУИРУЕМОГО ПЕРЕНОСНОГО УСКОРЕНИЯ ОБЪЕКТА

Бохонский А.И.¹, Майстришин М.М.², Рыжков А.И.³

Аннотация. На примере конструирования переносного поступательного ускорения (управление типа разгон-торможение) перемещением упругих объектов с использованием алгебраического полинома выявлено снижение энергетических затрат на реализацию движения с учетом ограничений. Получена регрессионная зависимость энергии от степени полинома и показано, что в алгоритме конструирования может непосредственно учитываться условие, отражающее значение предельно возможной энергии для достижения цели движения. Конструирование оптимального переносного движения объекта основано на использовании алгоритма реверсионного принципа оптимальности (РПО), который гласит, что аналитической кососимметричной функции переносного ускорения при реализации алгоритма соответствует дифференциальное уравнение Эйлера для восстанавливаемого функционала-критерия, принимающего минимальное значение.

Ключевые слова. Конструирование управления (переносного ускорения), цель движения, оптимальный разгон-торможение, энергии движения, предельная энергоемкость.

Введение. Основам общей теории колебаний линейных систем посвящена монография [1]. В [2] излагается теория колебаний линейных и нелинейных механических систем с приложениями к расчету объектов техники. Использование теории упругих колебаний, ее практическое применение в расчетах приведено в работах [3, 4]. Исследованию колебаний систем с конечным числом степеней свободы посвящен справочник [5]. В монографиях [6,7] приведены результаты исследований активного (управляемого) подавления колебаний упругих систем, решены задачи оптимизации колебательных процессов [8].

В работах [9-11] излагаются результаты поиска оптимальных управлений переносным движением упруго деформируемых систем с приложением к манипуляторам конечной жесткости; с использованием разработанного алгоритма конструирования найдены такие ускорения, которые обеспечивают абсолютный либо относительный покой упругих объектов в конце переносного движения. Результаты исследований иллюстрируются на примерах динамики упругих объектов с конечным числом степеней свободы с использованием сконструированных управлений.

В работе [12] показано, что при конструировании управлений не исключается (по сравнению с известным примером оптимального управления) существенная экономия энергии для практической реализации движений.

Конструирование оптимальных ускорений объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел позволило сформировать реверсионный принцип оптимальности (РПО), который предлагает, что аналитической кососимметричной функции переносного ускорения соответствует уравнение Эйлера для восстанавливаемого функционала потери. При этом время движения в случае упругих объектов находилось как один из общих корней системы трансцендентных уравнений, в которые превращаются моментные соотношения (в относительном движении). Таким образом, оптимальное переносное ускорение обеспечивало абсолютный покой упругого объекта в конечном состоянии.

В [13] доказано существование минимума восстанавливаемого функционала с использованием достаточных условий Якоби, Вейерштрасса и Лежандра, а также путем построения графического образа функционала. По существу, РПО основан на решении полной обратной задачи вариационного исчисления – переход от исходной аналитической функции через уравнение Эйлера к функционалу-критерию.

Если, например, исходная функция $x(t)$ является решением дифференциального уравнения $f(t, x, \dot{x}) = 0$, то, полагая это уравнение первой вариацией функционала, согласно уравнению Эйлера

$$\frac{d}{dx} F(\dot{x}, x) - \frac{d}{dt} \frac{dF(\dot{x}, x)}{d\dot{x}} = 0 \quad (1)$$

восстанавливается функционал $\int_0^T F(\dot{x}, x) dt$.

Отметим, что задача может не иметь единственного решения. Если, например, появляются два функционала, то возникает необходимость интерпретации образов таких функционалов. В [11] сформулирована теорема о численном равенстве определенных интегралов с различными подынтегральными функциями. В этом случае пределами интегрирования являются корни уравнения первообразных

$$\phi_1(t) - \phi_2(t) = 0. \quad (2)$$

Цель дальнейших исследований – совершенствование алгоритма конструирования оптимального управления переносным движением упруго деформируемых объектов с оценкой энергетических затрат на реализацию движения.

При конструировании управления разгон-торможение выявлена характерная закономерность: со стремлением степени задаваемого

полинома к бесконечности энергоемкость, по сравнению с известным управлением, найденным классическим вариационным методом с использованием заранее задаваемого критерия в виде нормы мощности [14], энергия уменьшается примерно в два раза, т.е.

$$\int_0^{T/2} U_n V_n dt = \int_0^{T/2} UV dt / 2, \quad n \rightarrow \infty \quad (3)$$

Если, например [13], при использовании критерия нормы мощности $\left(\int_0^T U^2 dt \right)$ энергия управления $U = 6L(T - 2t)/T^3$ (при $m = 1 \text{ кг}$) $A = \frac{2.25L^2}{T^2}$ Дж, то уже при показателе степени $n = 3$ и соответствующем управлении $U_3 = \frac{10L}{T^5}(T - 2t)^3$ энергия уменьшается до $A_3 = 1,5625 \frac{L^2}{T^2}$ Дж.

Для получения зависимости энергии управления от степени используемого полинома составлена таблица 1.

Таблица 1. – Зависимость энергоемкости от степени полинома для конструирования управления

Степень полинома n	1	3	5	7	9	11	13
K (энергия $A = K \frac{L^2}{T^2}$)	2.25	1,5625	1,36	1,206	1,19	1,17	1,124

Согласно Таблице 1 наиболее простой регрессионной зависимостью энергии от степени полинома управления является:

$$A(n) = \left(K + \frac{K}{n} \right) \frac{L^2}{T^2}, \quad (4)$$

где $K = 2,25/2$. С ростом степени полинома (**Рис.1**, при $n \rightarrow \infty$) энергия стремится почти к половине энергии, соответствующей степени полинома $n = 1$.

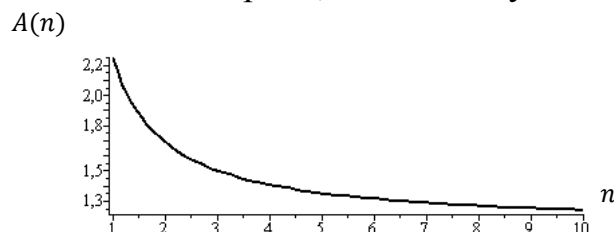


Рис.1 – График зависимости энергии от степени полинома $A(n)$

Не исключается применение алгоритма конструирования управления движением абсолютно твердых тел с учетом предельного значения энергоемкости, при которой все еще достигается цель движения –

перемещения при заданном времени на заданное расстояние объекта в новое состояние переносного покоя.

Пример 1. Известному варианту управления, как известно, соответствуют зависимости для управления, скорости и перемещения:

$$U(t) = \frac{6L(T-2t)}{T^2}, \quad V(t) = \frac{6Lt(T-t)}{T^3}, \quad S(t) = \frac{Lt^2(3T-2t)}{T^3}. \quad (5)$$

Графики $U(t)$, $V(t)$ и $S(t)$ на **Рис.2а,б**.

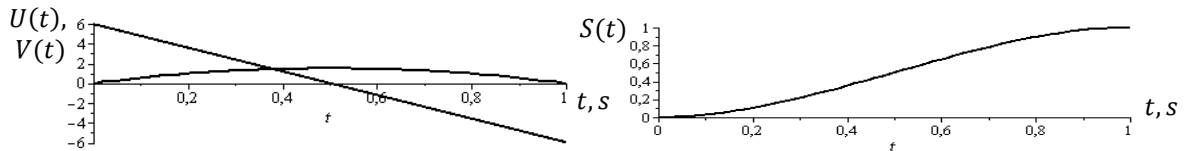


Рис.2 – Графики: а) скорости и ускорения; б) перемещения

Без учета сопротивления дифференциальное уравнение относительного движения (по отношению к осям, движущимся поступательно)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k^2x = -U(t), \quad (6)$$

где k – частота собственных колебаний упругого объекта с одной степенью свободы. Период собственных колебаний $T_1 = 2\pi/k$. Полагая общее время движения $T = T_1 r$ или $T = 2\pi r/k$, при $t = T = 2\pi r/k$ из моментных соотношений, которые означают равенство нулю перемещения и скорости в относительном движении в момент времени $t = T$ ($x(T) = 0$, $\dot{x}(T) = 0$), после ряда преобразований, получим систему трансцендентных уравнений:

$$x(r) = \sin(2\pi r) - \cos(2\pi r)\pi r - \pi r = 0, \quad \dot{x}(r) = \cos(2\pi r) + \sin(2\pi r)\pi r - 1 = 0. \quad (7)$$

В интервале $r = 1.3 - 3.6$ на графиках (**Рис.3**) показаны три общих корня системы (7). Наименьший корень равен 1.43 и при $k = 8.985$ время движения $T = 1c$

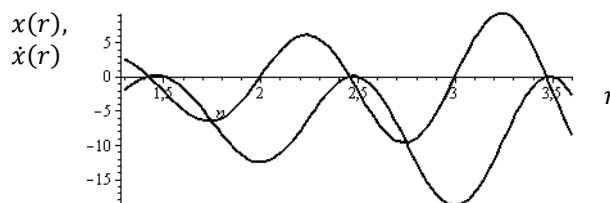


Рис.3 – Графики моментных соотношений

Графики колебаний упругого объекта ($x(t)$, $\dot{x}(t)$) в интервале движения ($T \geq t \geq 0$) изображены на **Рис.4**. В конце движения наступает

абсолютный покой ($\dot{S}_e(T) = 0$, $S_e(T) = L$; $x(T) = 0$, $\dot{x}(T) = 0$).

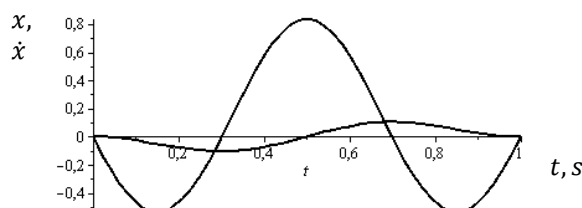


Рис.4 – Перемещение и скорость в относительном движении

Пример 2. При конструировании управления движением объекта с возможной минимальной энергией принят полином

$$S(t) = \sum_{i=1}^5 C_i t^{i+1}, \quad (8)$$

где $C_i = \text{const}$. Для скорости и ускорения следуют зависимости: $V(t) = dS / dt$; $U(t) = dV / dt$. При определении констант использованы краевые условия, условия косой симметрии управления и условие предельно возможной энергоемкости:

$$\begin{aligned} S(T) = L; \quad U(0) + U(T) = 0; \quad U(T/2) = 0; \\ \int_0^{T/2} U(t) dt + \int_{T/2}^T U(t) dt = 0; \quad \int_0^{T/2} U(t)V(t) dt - \frac{A_1}{2} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $A_1 = \frac{2,25L^2}{T^2}$; При $T = 1$ с, $L = 1$ м графики $U(t)$, $V(t)$ и $S(t)$ изображены на **Рис.5**. $U(t) = 13.0294 - 96.3532t + 210.8831t^2 - 140.5887t^3 + 2.22758 \cdot 10^{-8} t^4$.

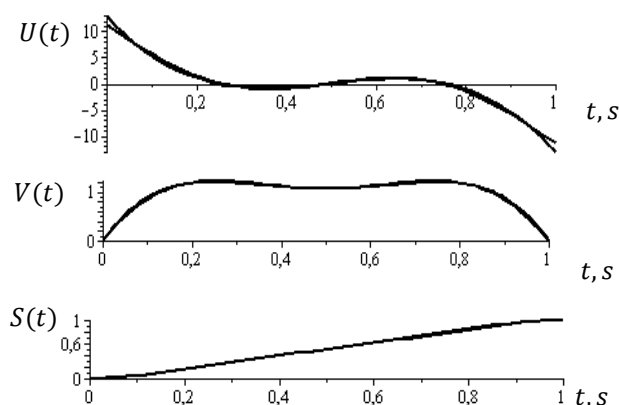


Рис.5 – Совмещенные графики ускорений, скоростей и перемещений

Пример 3. В качестве предлагаемого другого типа управления (переносного ускорения) принята функция:

$$U(t) = a \sin pt + bt + c, \quad (10)$$

где $a, b, c = \text{const}$. Из $U(t)$ выражения для скорости и ускорения:

$$V(t) = \int U(t)dt + C_1; \quad S(t) = \int V(t)dt + C_2.$$

Для определения постоянных a, b, c, C_1, C_2 приняты условия:

$$S(0) = 0; \quad V(0) = 0; \quad S(T) = L, \quad V(T) = 0, \quad 2 \int_0^{T/2} UVdt - \frac{A_1}{2} = 0. \quad (11)$$

Принятые условия образуют систему нелинейных уравнений, численное решение которой найдено при: $T = 1$ с, $L = 1$ м, $p = 2\pi c^{-1}$. Ускорение принимает вид:

$$U(t) = -5.5209 \sin(2\pi t) - 22.5441t + 11.2720. \quad (12)$$

Графики $U(t)$, $V(t)$ и $S(t)$ совмещены с графиками, изображенными на Рис.5. Сравнение вариантов дано с использованием Таблицы 2.

Таблица 2. – Обобщенные интегральные характеристики управлений

№ Примера	Обобщенные интегральные критерии			
	$J_1 = \int_0^T U^2 dt$ Норма мощности	$J_2 = 2 \int_0^{T/2} UV dt$ Энергоемкость	$J_3 = 2 \int_0^T V^2 dt$ Действие (по Лагранжу)	$J_4 = J_2 \cdot J_3$ Энергодействие
1	$12 \frac{L^2}{T^3}$	$2,25 \frac{L^2}{T^2}$	$1,2 \frac{L^2}{T}$	$2,7 \frac{L^4}{T^3}$
2	$19,06 \frac{L^2}{T^3}$	$1,124 \frac{L^2}{T^2}$	$1,078 \frac{L^2}{T}$	$1,212 \frac{L^4}{T^3}$
3	$17,97 \frac{L^2}{T^3}$	$1,123 \frac{L^2}{T^2}$	$1,088 \frac{L^2}{T}$	$1,224 \frac{L^4}{T^3}$

Как следует из Таблицы 2, управление (номер 2) обладает преимуществом (в смысле экономии энергии) по сравнению с управлением с номером 1.

Заключение.

1. С ростом степени полинома ускорения ($n \rightarrow \infty$) затрачиваемая на реализацию управляемого движения энергия стремится к своему предельному значению.

2. Непосредственное использование в алгоритме конструирования дополнительного энергетического условия, например $\left(A_n - \frac{A_1}{2} = 0\right)$ с ростом n приводит к снижению энергоемкости управляемого движения вплоть до такого предельного значения энергоемкости, которая все ещё обеспечивает достижение цели движения.

3. Приемлемое время движения находится из числа общих корней системы трансцендентных уравнений, в которые превращаются моментные соотношения (в относительном движении). Абсолютный покой в конце движения означает одновременное достижение переносного и относительного покоя.

Библиографический список

1. Ссылки Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Из-во «Наука» 1967. – 444 с.
2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М., «Высшая школа», 1972. – 416 с.
3. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л. «Машиностроение», 1976. – 320 с.
4. Бабаков И.М. Теория колебаний М., 1968. – 560 с.
5. Вибрации в техники. Справочник. В 6-ти т./ Ред.. совет.: В.Н. Челомей (пред.) М.: Машиностроение, 1978. – Т.1. Колебание линейных систем / под ред. В.В. Болотина. 1978. – 352 с.
6. Карновский И.А., Почман Ю.М., Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем. – Киев: Донецк: Вища школа. 1982. – 116 с.
7. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем. Л. «Машиностроение», 1976. – 248 с.
8. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы: динамика, уравнение, оптимизация. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
9. Бохонский А.И. Оптимальные управления переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения/ А.И. Бохонский, Н.Н. Варминская, М.И. Мозолевский. Под общ. ред. А И. Бохонского. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.
10. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Вариационное и реверсионное исчисление в механике. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.
11. Бохонский А.И., Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М., 2016. – 174 с.
12. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов / А.И. Бохонский// фундаментальные основы механики: матер. Международной науч.-практич. конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С.38-41.
13. Теория автоматического управления. Ч.II. Теория нелинейных специальных систем автоматического управления. Под ред. А.А. Воронова. М.: «Высшая школа», 1997.– 288с.

Bibliography

1. Timoshenko S.P. Fluctuations in engineering. Publishing house "Science" 1967. – 444 p.

2. Biderman V.L. Applied theory of mechanical vibrations. M., "High School", 1972. – 416 p.
3. Panovko Ya.G. Foundations of the applied theory of vibrations and impact. L. "Mechanical Engineering", 1976. – 320 p.
4. Babakov I.M. Theory of oscillations M., 1968. – 560 p.
5. Vibration in technology. Directory. In 6 volumes / Ed. Advice: V.N. Chelomey (prev.) M.: Mechanical Engineering, 1978. - Vol. 1. Oscillation of linear systems / ed. V.V. Bolotina. 1978. – 352 p.
6. Karnovsky IA, Pochman Yu.M., Methods of optimal control of oscillations of deformable systems. - Kiev: Donetsk: Vishcha school. 1982. – 116 p.
7. Trotsky V.A. Optimal vibration processes of mechanical systems. L. "Mechanical Engineering", 1976. – 248 p.
8. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. Manipulation robots: dynamics, equation, optimization. - M.: Nauka, 1989. – 368 p.
9. Bokhonsky A.I. Optimal control of portable movement of deformable objects: theory and technical applications / A.I. Bokhonsky, N.N. Warminskaya, M.I. Mozolevsky. Under total. ed. And I. Bokhonsky. - Sevastopol: publishing house SevNTU, 2007. – 296 p.
10. Bokhonskiy AI, Warminskaya NI, Variational and Reversion Calculus in Mechanics. - Sevastopol: SevNTU, 2012. – 212 p.
11. Bokhonskiy AI, Reverse principle of optimality / AI Bokhonskiy. Bohonsky. - M.: University textbook: INFRA-M., 2016. – 174 p.
12. Bokhonsky A.I. Energy intensity of objects movement control / A.I. Bohonsky // Fundamental Foundations of Mechanics: mater. International scientific and practical conferences. - Novokuznetsk: SRC MS, 2017. – pp. 38-41.
13. Theory of automatic control. Part II. Theory of nonlinear special automatic control systems. Ed. A.A. Voronova. M.: "High school", 1997. – 288p.

¹*Бохонский Александр Иванович, д-р техн. наук, проф.,
bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет,*

²*Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц.,
mihail.maystrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет,*

³*Рыжков Александр Игоревич, ассистент, ryzhkov2206@mail.ru,
Севастополь, Севастопольский государственный университет.*

REDUCING OF ENERGY CONSUMPTION FOR THE REVERSE CONSTRUCTED TRANSLATIONAL ACCELERATION OF THE OBJECT

A.I. Bokhonsky, M.M. Maistrishin, A.I. Ryzhkov

Taking as an example construction of the translational acceleration (acceleration-deceleration type) for elastic objects, using algebraic polynomial, was found reduction of energy costs for the motion implementation with restrictions. The regression dependence of the energy on the degree of the polynomial was obtained, and it was shown that in design algorithm can be directly taken into account the condition that reflects the value of the maximum possible energy to achieve the goal of motion. The design of the optimal portable motion of an object is based on the use of the algorithm of the reverse optimality principle (ROP): in the implementation of the algorithm, the analytical skew-symmetric function of the translational acceleration corresponds to the Euler differential equation for the restored criterion functional which takes the minimum value.

Keywords: design of control (portable acceleration), goal of motion, optimal acceleration-deceleration, energy of motion, ultimate energy consumption.

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

Maystrishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, mihail.maystrishin@gmail.com Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

Ryzhkov Aleksandr Igorevich, assistant, ryzhkov2206@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

ОПТИМИЗАЦИЯ СРОКОВ ПРОФИЛАКТИКИ ОДНОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О СИСТЕМЕ

Песчанский А.И.¹

Аннотация. Рассматривается ненадежная восстанавливаемая одноканальная система обслуживания с потерями, в которой во время обслуживания требований могут происходить отказы прибора. Все стохастические параметры, описывающие систему, задаются своими первыми двумя начальными моментами. Предложена методика вычисления стационарных вероятностных и экономических показателей системы с учетом проведения технического обслуживания прибора в зависимости от уровня его суммарной наработки. Приводится численный пример вычисления стационарных характеристики системы и определения оптимальных сроков проведения технического обслуживания прибора.

Ключевые слова. Техническое обслуживание, суммарная наработка, аппроксимация законов распределения, стационарные показатели системы, оптимизация периодичности технического обслуживания.

Введение. Системы обслуживания с ненадежными приборами исследовались многими авторами. Обзор результатов исследований в этом направлении можно найти в [1,2,3]. Одним из методов повышения надежности систем является проведение предупредительного технического обслуживания (ТО). Получение расчетных формул для вычисления стационарных характеристик в предположении общего вида всех параметров, описывающих случайные процессы в системе, вызывает определенные трудности. Решить эту задачу удастся, в частности, с привлечением теории полумарковских процессов с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний. Так, в [4,5] построены полумарковские модели функционирования одноканальной системы с потерями и учетом проведения ТО ненадежного прибора по суммарной наработке. В настоящей статье предлагаются алгоритмы определения оптимальных сроков проведения ТО с такой же стратегией при условии ограниченной информации о системе: известны только первые два начальных момента каждого из случайных параметров, описывающих систему. Данная работа является продолжением исследований автора, начатых в [6].

Постановка задачи. Рассмотрим ненадежную однолинейную систему обслуживания, в которой отсутствует очередь на обслуживание. Прибор может отказать только во время обслуживания требования, отказ обнаруживается мгновенно и сразу начинается его аварийное

восстановление. Обслуживание требования, находящегося на приборе во время его отказа, прерывается и на дообслуживание оно не возвращается. Под наработкой прибора до отказа понимается время, затраченное прибором на обслуживание требований без учета времени пребывания прибора в состоянии ожидания. Отсчет наработки начинается с начального момента времени или с момента окончания аварийного восстановления прибора.

Предполагается, что законы распределения случайных параметров, описывающих протекающие в системе случайные процессы, неизвестны, а известны лишь первые два начальных момента каждого из них. Так, $\nu_{1,\beta}$ и $\nu_{2,\beta}$ — соответственно первый и второй начальные моменты времени β между требованиями во входящем потоке; $\nu_{1,\alpha}$ и $\nu_{2,\alpha}$ — начальные моменты времени α обслуживания прибором требования; $\nu_{1,\gamma}$ и $\nu_{2,\gamma}$ — начальные моменты наработки γ прибора до отказа; $\nu_{1,a}$ и $\nu_{2,a}$ — начальные моменты длительности σ_a аварийного восстановления прибора.

В системе предполагается проведение ТО прибора со следующей стратегией. В начальный момент времени начинается обслуживание поступившего в систему требования и назначается предельно допустимый детерминированный уровень суммарной наработки прибора τ , при достижении которого обслуживание требования прерывается и сразу начинается ТО прибора. Под суммарной наработкой прибора в данный момент времени понимается сумма наработок прибора между его отказами, начиная с начального момента времени или с момента окончания предыдущего ТО прибора. Требование, находящееся на приборе в момент начала его ТО, теряется и на дообслуживание не возвращается. Закон распределения длительности σ_p ТО прибора также неизвестен, а известны только начальные моменты $\nu_{1,p}$ и $\nu_{2,p}$ длительности σ_p . Заметим, что отсчет наработки прибора до отказа начинается как после ТО, так и аварийного восстановления прибора, в то время как отсчет суммарной наработки до следующего ТО начинается только после завершения предыдущего ТО. После проведения любой из ремонтных работ надежностные характеристики прибора полностью восстанавливаются.

Цель исследований — найти значения предельно допустимых уровней суммарной наработки прибора для проведения его ТО, которые обеспечат максимально эффективные стационарные экономические показатели системы: среднюю удельную прибыль за единицу календарного времени и средние удельные затраты за единицу исправного функционирования системы.

Основные результаты. Полумарковская модель функционирования рассматриваемой системы обслуживания в случае известных законов

распределения всех стохастических параметров построена в [4]. Чтобы воспользоваться результатами этой работы, аппроксимируем законы распределения случайных параметров по известным начальным моментам ν_1 и ν_2 с помощью известных алгоритмов [7,8,9]. С этой целью для этого каждого стохастического параметра, найдем значение коэффициента вариации V :

$$V = \sqrt{\nu_2 - \nu_1^2} / \nu_1. \quad (1)$$

Если коэффициент вариации параметра ς удовлетворяет неравенству $0 < V_\varsigma < 1$, то для аппроксимации выберем многофазное распределение с двумя разными параметрами экспоненциальных распределений в фазах: $k-1$ фаза с параметром χ и одна фаза с параметром η [7,8]. В этом случае аппроксимирующая функция распределения определяется выражением

$$Z(t) = 1 - \frac{\chi^{k-1}}{(\chi - \eta)^{k-1}} \left(e^{-\eta t} - e^{-\chi t} \sum_{i=0}^{k-2} \frac{(\chi t)^i}{i!} \left[\left(\frac{\chi - \eta}{\chi} \right)^i - \left(\frac{\chi - \eta}{\chi} \right)^{k-1} \right] \right), \chi \neq \eta, \quad (2)$$

где значения параметров экспоненциальных фаз рассчитываются по формулам

$$\chi = \left[\frac{\nu_{1,\varsigma}}{k} \left(1 - \sqrt{\frac{k(V_\varsigma)^2 - 1}{k-1}} \right) \right]^{-1}, \quad \eta = \left[\frac{\nu_{1,\varsigma}}{k} \left(1 + \sqrt{(k-1)(k(V_\varsigma)^2 - 1)} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

k — ближайшее большее целое число по отношению к $(V_\varsigma)^{-2}$.

В случае коэффициента вариации $V_\varsigma > 1$, функцию распределения случайной величины ς будем аппроксимировать двухфазным гиперэкспоненциальным распределением специального вида [9] с функцией распределения

$$Z(t) = 1 - (1-p)e^{-\eta t} - pe^{-p\eta t}, \quad \eta > 0, 0 < p < 1, \quad (4)$$

где значения параметров p и η однозначно определяются из системы уравнений:

$$p + \eta \nu_{1,\varsigma} = 2, \quad \frac{2(1+p-p^2)}{p(2-p)^2} = (V_\varsigma)^2 + 1. \quad (5)$$

С помощью указанных алгоритмов аппроксимации, найдем выражения для функции распределения $G(t) = P\{\beta \leq t\}$ времени β между требованиями во входящем потоке; функции распределения $F(t) = P\{\alpha \leq t\}$ времени α обслуживания требования; функции распределения $\Phi(t) = P\{\gamma \leq t\}$

наработки γ прибора до отказа; функции распределений $\Psi_a(t)$ и $\Psi_p(t)$ времен σ_a и σ_p аварийного восстановления и ТО прибора соответственно.

Перейдем к определению стационарных характеристик системы. Рассматриваемая система может находиться в следующих физических состояниях: 0 — прибор в работоспособном состоянии ожидает требование; 1 — прибор занят обслуживанием; 2 — проводится аварийное восстановление прибора; 3 — проводится ТО прибора. Обозначим через $p_i^*(\tau)$ финальную вероятность пребывания системы в состоянии i , $i = \overline{0,3}$. Учитывая результаты [4] формулы для вычисления этих вероятностей принимают вид

$$p_1^*(\tau) = \frac{\tau}{\nu_{1,\beta} \overline{N}(\tau)}, \quad p_2^*(\tau) = \frac{\nu_{1,a} H_\varphi(\tau)}{\nu_{1,\beta} \overline{N}(\tau)}, \quad p_3^*(\tau) = \frac{\nu_{1,p}}{\nu_{1,\beta} \overline{N}(\tau)}, \quad (6)$$

$$p_0^*(\tau) = 1 - \frac{\tau + \nu_{1,a} H_\varphi(\tau) + \nu_{1,p}}{\nu_{1,\beta} \overline{N}(\tau)}.$$

где $\overline{N}(\tau)$ — среднее число требований, поступающих в систему за промежуток времени между соседними ТО прибора:

$$\begin{aligned} \overline{N}(\tau) = & 1 + H_\varphi(\tau) + \int_0^\tau \hat{H}_\varphi(\tau - x) \overline{\Phi}(x) h_f(x) dx + \\ & + \int_0^\tau \hat{H}_\varphi(\tau - y) \overline{\Phi}(y) \left[\overline{F}(y) h_g(y) + \int_0^y h_f(y - x) \overline{F}(x) h_g(x) dx \right] dy + \\ & + \int_0^\infty \overline{\Psi}_a(x) dx \int_0^\tau \hat{H}_\varphi(\tau - t) \varphi(t) \overline{F}(t) h_g(t + x) dt + \\ & + \int_0^\infty \overline{\Psi}_a(x) dx \int_0^\tau \hat{H}_\varphi(\tau - t) \varphi(t) dt \int_0^t h_f(t - y) \overline{F}(y) h_g(y + x) dy + \\ & + \overline{\Phi}(\tau) \int_0^\infty \overline{\Psi}_p(x) \left[\overline{F}(\tau) h_g(x + \tau) + \int_0^\tau h_f(\tau - y) \overline{F}(y) h_g(y + x) dy \right] dx + \\ & + \int_0^\infty \overline{\Psi}_p(x) dx \int_0^\tau h_\varphi(\tau - t) \overline{\Phi}(t) \left[\overline{F}(t) h_g(x + t) + \int_0^t h_f(t - y) \overline{F}(y) h_g(y + x) dy \right] dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $\overline{F}(t) = 1 - F(t)$, $f(t)$ — плотность распределения времени α обслуживания требования; $\overline{\Phi}(t) = 1 - \Phi(t)$, $\psi_a(t)$ и $\psi_p(t)$ — плотности распределения времен σ_a и σ_p аварийного восстановления и технического обслуживания прибора соответственно; $H_g(t)$ — функция восстановления, порожденная временем β между требованиями во входящем потоке: $H_g(t) = \sum_{k=1}^\infty G^{*(k)}(t)$, $G^{*(k)}(t)$ — k -кратная свертка функции распределения $G(t)$, $G^{*(1)}(t) = G(t)$; $h_f(t)$ — плотность функции восстановления $H_f(t)$,

порожденной временем α обслуживания требования, $h_\varphi(t)$ — плотность функции восстановления $H_\varphi(t)$, порожденной наработкой γ прибора до отказа, $\hat{H}_\varphi(t) = 1 + H_\varphi(t)$.

Средняя удельная прибыль $S(\tau)$ за единицу календарного времени и средние удельные затраты $C(\tau)$ за единицу времени исправного функционирования системы определяются выражениями [4]:

$$S(\tau) = \frac{c_1 \bar{N}_{ser}(\tau) - c_a \nu_{1,a} H_\varphi(\tau) - c_p \nu_{1,p}}{\nu_{1,\beta} \bar{N}(\tau)}, \quad (8)$$

$$C(\tau) = \frac{c_a \nu_{1,a} H_\varphi(\tau) + c_p \nu_{1,p}}{\nu_{1,\beta} \bar{N}(\tau) - (\nu_{1,a} H_\varphi(\tau) + \nu_{1,p})}, \quad (9)$$

где c_1 — доход, получаемый за обслуживание одного требования; c_a — затраты за единицу времени аварийного восстановления; c_p — затраты за единицу времени проведения ТО прибора,

$$\bar{N}_{ser}(\tau) = \int_0^\tau \hat{H}_\varphi(\tau - x) \Phi(x) h_f(x) dx$$

— среднее число требований, обслуженных между двумя соседними ТО прибора.

Удельная прибыль $S(\tau)$ и удельные затраты $C(\tau)$ являются функциями предельно допустимого уровня наработки τ . Поэтому задача оптимизации экономических показателей системы сводится к нахождению точек абсолютного экстремума этих функций. В зависимости от выбранной целевой функции среди корней уравнения $S'(\tau) = 0$ или $C'(\tau) = 0$ следует выбрать тот, при котором достигается абсолютный экстремум. Если уравнение не имеет корней, то абсолютный экстремум достигается при $\tau = \infty$. Это означает, что проводить ТО прибора нецелесообразно, т.е. оптимальной является пассивная стратегия обслуживания.

Пример. В Таблице 1 приведены численные значения начальных моментов $\nu_{1,\zeta}$ и $\nu_{2,\zeta}$ первого порядка и второго порядков для параметров системы ζ . Доход за обслуженное требование равен $c_1 = 6$ ден. ед., затраты за час аварийного восстановления прибора и его ТО составляют $c_a = 18$ ден. ед. и $c_p = 9$ ден. ед. соответственно. Требуется вычислить стационарные характеристики системы и определить оптимальные предельно допустимые уровни суммарной наработки прибора для проведения его ТО, выбрав в качестве критерия оптимальности удельную прибыль $S(\tau)$, удельные затраты $C(\tau)$.

Таблица 1. – Начальные моменты параметров системы

Начальные моменты	Параметры системы ζ				
	время между требованиями в потоке, β	время обслуживания требования, α	наработка прибора до отказа, γ	время аварийного восстановления прибора, σ_a	время ТО прибора, σ_p
$V_{1,\zeta}$, час	0,294	0,351	3,402	0,321	0,133
$V_{2,\zeta}$, час 2	0,112	0,214	13,417	0,282	0,062

Для каждого параметра ζ системы, по формуле (1) найдем значения коэффициентов вариации V_ζ и в зависимости от его величины выберем аппроксимирующее распределение параметра. В результате приходим к следующим утверждениям.

Для входящего потока коэффициент вариации времени β между требованиями $V_\beta = 0,544 < 1$, поэтому в качестве аппроксимирующего распределения возьмем гипоекспоненциальное распределение специального вида (2). Так как $1/(V_\beta)^2 = 3,381$, то $k = 4$, с помощью (3) находим $\chi = 18,068$, $\eta = 7,815$ и по формуле (2) определяем функцию распределения $G(t) = P(\beta \leq t)$.

Функция восстановления $H_g(t)$, порожденная входящим потоком требований, находится с помощью обратного преобразования Лапласа функции

$$(\tilde{H}_g)(s) = \left[s \left(1 + \frac{s}{\eta} \right) \left(1 + \frac{s}{\chi} \right)^{k-1} - s \right]^{-1}$$

и имеет вид

$$H_g(t) = 0,116 e^{-30,698t} + 3,401 t - 0,352 + e^{-15,661t} (0,236 \cos 14,008t + 0,275 \sin 14,008t).$$

Аналогично для времени обслуживания требования коэффициент вариации $V_\alpha = 0,858 < 1$, $1/(V_\alpha)^2 = 1,357$, поэтому $k = 2$. Функция распределения $F(t) = P(\alpha \leq t)$ определяется с помощью (2), в которой $\eta = 3,375$, $\chi = 18,291$.

Для наработки γ до отказа прибора коэффициент вариации $V_\gamma = 0,399 < 1$, $1/(V_\gamma)^2 = 6,278$, $k = 7$; функция распределения $\Phi(t) = P(\gamma \leq t)$ также задается выражением (2), где $\eta = 1,124$, $\chi = 2,388$. Функция

восстановления $H_\varphi(t)$, порожденная наработкой прибора до отказа, имеет вид

$$H_\varphi(t) = 0,294t - 0,420 + e^{-4,174t} (0,138 \cos 0,918t + 0,034 \sin 0,918t) + \\ + e^{-0,844t} (0,144 \cos 1,628t + 0,308 \sin 1,628t) + \\ + e^{-2,704t} (0,138 \cos 2,054t + 0,119 \sin 2,054t).$$

Для длительности аварийного восстановления σ_a коэффициент вариации $V_a = 1,318 > 1$. Аппроксимируем эту случайную величину двухфазным гиперэкспоненциальным распределением специального вида с функцией распределения $\Psi_a(t) = P(\sigma_a \leq t)$ (4), в которой значения параметров $p = 0,311$ и $\eta = 15,262$ находятся из системы уравнений (5).

Аналогично для длительности ТО σ_p прибора (так как $V_p = 1,583 > 1$), функция распределения $\Psi_a(t) = P(\sigma_a \leq t)$ определяется формулой (4), в которой $p = 0,206$, $\eta = 13,489$.

В **Таблице 2** для различных предельно допустимых уровней τ наработки прибора на ТО приводятся вычисленные по формулам (6)–(9) стационарные показатели системы: финальные вероятности $p_i^*(\tau)$ пребывания системы в различных физических состояниях, значения средних удельных затрат $C(\tau)$ и средней удельной прибыли $S(\tau)$ системы.

Значению аргумента $\tau = \infty$ соответствуют показатели системы в случае пассивной стратегии обслуживания прибора (ТО не проводится). Через τ_c и τ_s обозначены точки абсолютного экстремума для критериев $C(\tau)$ и $S(\tau)$ соответственно.

Таблица 2. – Стационарные характеристики системы

Допустимый уровень наработки на ТО, час	Финальные вероятности состояний				Экономические показатели	
	$p_0^*(\tau)$	$p_1^*(\tau)$	$p_2^*(\tau)$	$p_3^*(\tau)$	$C(\tau)$, ден.ед.	$S(\tau)$, ден.ед.
$\tau = \infty$	0,361	0,584	0,055	–	1,049	8,852
$\tau_c = 1,638$	0,385	0,563	0,006	0,046	0,566	8,800
$\tau_s = 2,235$	0,380	0,570	0,013	0,037	0,626	8,932

Из результатов вычислений следует, что удельные затраты $C(\tau)$ становятся минимальными, если ТО прибора проводить в момент достижения суммарной наработкой уровня $\tau_c = 1,638$ часа, при этом они уменьшаются на 46,062% по сравнению с пассивной стратегией обслуживания прибора. Максимальная прибыль достигается в случае предельного уровня суммарной наработки $\tau_s = 2,235$ часа, по сравнению с

пассивной стратегией обслуживания прибора прибыль увеличится на 0,907%.

Графики зависимостей критериев от предельно допустимого уровня проведения ТО прибора представлены на **Рис.1**.

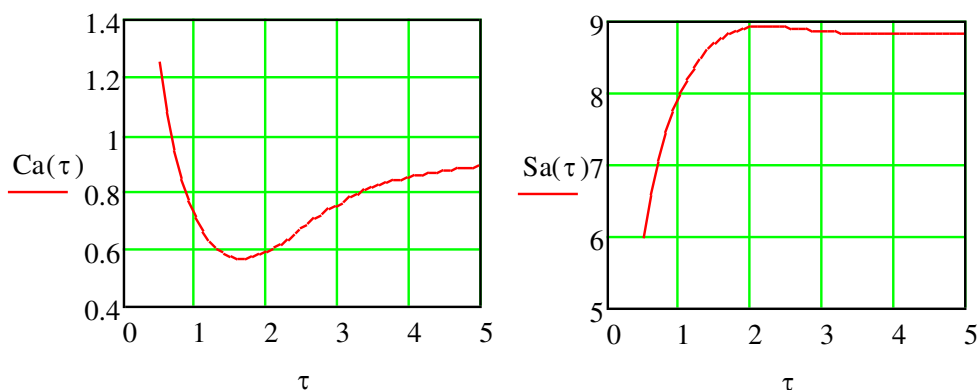


Рис.1– Графики зависимости средних затрат $C(\tau)$, прибыли $S(\tau)$ от предельно допустимого уровня τ суммарной наработки

Заключение. В работе предложена методика определения финальных вероятностей физических состояний, средней удельной прибыли и средних удельных затрат однолинейной системы обслуживания с ненадежным восстанавливаемым прибором при условии, что известными являются первые два начальных момента каждого из стохастических параметров, описывающих систему. Рассмотрен численный пример реализации предложенной схемы вычисления стационарных показателей системы с учетом проведения технического обслуживания прибора по наработке и решены задачи оптимизации сроков его проведения.

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

Библиографический список

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.:ЛКИ, 2012. – 400 с.
2. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания. – М.: Изд-во РУДН, 1995. – 529 с.
3. Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания / И.Н. Коваленко // Итоги науки. Сер. Теор. вероятн. Мат. стат. Теор. кибернет. 1970. – М.: ВИНТИ, 1971. – С. 5–109.
4. Peschansky A.I., Kovalenko A.I. Semi-Markov Model of a Single-Server Queue with Losses and Maintenance of an Unreliable Server / A.I. Peschansky, A.I. Kovalenko // Cybernetics and Systems Analysis. – 2015. – Vol. 51. – No.4. – pp. 632–643.

5. Peschansky A.I., Kovalenko A. I. A Semi-Markov Model for an Unreliable Single-Line Queueing System with Losses and Different Restoration Types / A.I. Peschansky, A.I. Kovalenko // Automation and Remote Control. – 2016. – Vol. 77. – No.12. — pp. 2192–2204.
6. Песчанский А.И. Техническое обслуживание по наработке ненадежной однолинейной системы обслуживания с потерями и неполной информацией о ее параметрах / А.И. Песчанский // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2020. – №3(11). – С.77–87.
7. Алиев Т.И. Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания / Т.И. Алиев // Науч.-техн. вестн. информ. технол., механ. и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 88–93.
8. Алиев Т.И. Задачи синтеза систем с потерями / Т.И. Алиев // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. Т. 55. – № 10. – С. 57–63.
9. Смирнов С.В. Моделирование «сверхнерегулярных» случайных величин по экспериментальным данным / С.В. Смирнов // Автоматиз. науч. исслед.: межвуз. сб. научн. трудов. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – С. 52–57.

Bibliograficheskiy spisok

1. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya. – M.: LKI, 2012. – 400 s.
2. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. – M.: Izd-vo RUDN, 1995. – 529 s.
3. Kovalenko I.N. Teoriya massovogo obsluzhivaniya / I.N. Kovalenko // Itogi nauki. Ser. Teor. veroyat. Mat. stat. Teor. kibernet. 1970. – M.: VINITI, 1971. – S. 5–109.
4. Peschansky A.I., Kovalenko A.I. Semi-Markov Model of a Single-Server Queue with Losses and Maintenance of an Unreliable Server / A.I. Peschansky, A.I. Kovalenko // Cybernetics and Systems Analysis. – 2015. – Vol. 51. – No.4. – pp. 632–643.
5. Peschansky A.I., Kovalenko A. I. A Semi-Markov Model for an Unreliable Single-Line Queueing System with Losses and Different Restoration Types / A.I. Peschansky, A.I. Kovalenko // Automation and Remote Control. – 2016. – Vol. 77. – No.12. — pp. 2192–2204.
6. Peschanskij A.I. Tekhnicheskoe obsluzhivanie po narabotke nenadezhnoj odnolinejnoj sistemy obsluzhivaniya s poteryami i nepolnoj informaciej o ee parametrah / A.I. Peschanskij // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii. – 2020. – №3 (11). – S.77–87.
7. Aliev T.I. Approksimatsiya veroyatnostnyih raspredeleniyy v modelyah massovogo obsluzhivaniya / T.I. Aliev // Nauch.-tehn. vestn. inform. tehnol., mehan. i optiki. – 2013. – № 2 (84). – С. 88–93.
8. Aliev T.I. Zadachi sinteza sistem s poteryami / T.I. Aliev // Izv. vuzov. Priborostroenie. – 2012. Т. 55. – №10. – С. 57–63.

9. Smirnov S.V. Modelirovanie «sverhneregulyarnyih» sluchaiynyih velichin po eksperimentslным данным / S.V. Smirnov // Avtomatiz. nauchn. issled.: mezhvuz. sb. nauchn. trudov. – Kuizdyishev: KuAI, 1988. – S. 52–57.

¹Песчанский Алексей Иванович, д-р техн. наук, проф.,
peschansky_sntu@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

**OPTIMIZATION OF MAINTENANCE PERIODICITY FOR ONE-
SERVER QUEUEING SYSTEM IN CASE OF INCOMPLETE INFORMATION**

A.I. Peschansky

An unreliable restorable loss single-server queueing system is considered. Server failures may occur during request service. All the stochastic parameters describing the system are given by the two moments. The algorithm is proposed for calculating stationary probabilistic and economic characteristics of the system. Server maintenance is taken into account in terms of total operation time. A numerical example of calculating system stationary characteristics and determining the optimal server maintenance periodicity is given.

Keywords: maintenance, total operation time, approximation of distribution laws, system stationary characteristics, optimization of maintenance periodicity.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ОДНОНИТОЧНЫМ КРУГОМ РЕЗЬБЫ НА ЗАГОТОВКАХ РЕЗЬБОНАКАТНЫХ РОЛИКОВ

Копп В.Я.,¹ Леонтьев В.В.,² Липка В.М.,³ Рапацкий Ю.Л.⁴

Аннотация. *Качество крепежных деталей с наружной резьбой для машиностроения и других отраслей промышленности в значительной мере определяется технологической наследственностью при их изготовлении. В частности, наружные дефекты резьбонакатных роликов наследуются накатываемыми с их помощью резьбовыми поверхностями. Резьбонакатывание является наиболее эффективным процессом получения наружных резьб, но проблема изготовления качественных резьбонакатных роликов не решена до настоящего времени. Для исследования тепловых процессов при взаимодействии однониточного шлифовального круга с заготовкой резьбонакатного ролика предложена конечно-элементная модель в среде COMSOL Multiphysics. Модель позволяет оценить температуру в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой. Результаты моделирования могут быть использованы для выбора оптимальных режимов шлифования резьбовых поверхностей.*

Ключевые слова. *Резьбошлифование, тепловые процессы, прижоги, резьбонакатные ролики*

Анализ исследований и публикаций. Одной из главных проблем при шлифовании резьбы на закаленных заготовках из легированных сталей является возникновение прижогов в зоне взаимодействия заготовки с вершиной шлифовального круга (ШК). Современный подход к обеспечению качества шлифованной резьбы на резьбонакатных роликах и других ответственных резьбовых деталях и изделиях, в большинстве случаев состоит в предварительном протачивании твердосплавным резцом резьбовой канавки с последующим шлифованием однониточным ШК. Ограниченное пространство, в котором происходит взаимодействие ШК и заготовки, невозможность обеспечения эффективного непрерывного охлаждения и, вместе с тем, высокие требования к качеству готовой резьбы создают противоречие, преодолеть которое не удалось до настоящего времени, несмотря на значительное количество исследований и публикаций [1-7]. Исследование тепловых явлений, происходящих в зоне контакта однониточного ШК с заготовкой при резьбошлифовании, представляет собой сложную задачу, что обусловлено нестационарностью процессов тепловыделения, теплопередачи внутри заготовки и рассеяния тепла в окружающую среду [8].

Цель исследований: построение конечно-элементной модели для исследования тепловых процессов, происходящих при взаимодействии

одностороннего шлифовального круга и закаленной заготовки при шлифовании на ней наружной резьбы.

Изложение основного материала. Учитывая недостаточную разработанность аналитических методов моделирования выделения и рассеяния тепла в зоне контакта ШК с заготовкой, предлагается построить конечно-элементную модель исследуемого процесса. Для моделирования целесообразно использовать COMSOL Multiphysics. На **Рис.1** показана схема контакта вершины ШК с заготовкой в процессе шлифования резьбовой канавки.

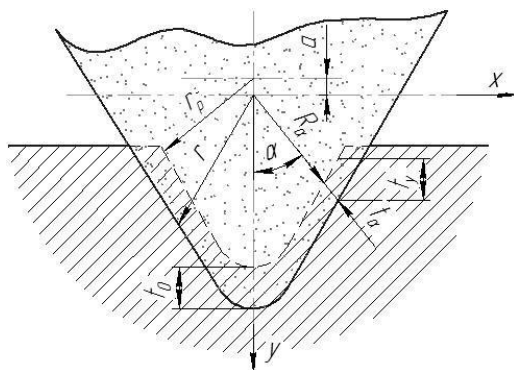


Рис.1 – Схема взаимодействия ШК с заготовкой резьбонакатного ролика

Визуальная 3D-модель области взаимодействия ШК с заготовкой и расчетная схема показана на **Рис.2**. В качестве допущений приняты предположения об абсолютной жесткости участков круга и заготовки и отсутствии колебаний при их взаимодействии. Рассмотрены только те части круга и заготовки, которые находятся в непосредственной близости от зоны контакта. Длины отдельных участков сетки на **Рис.2** приведены в мм. Возможным влиянием нагрева всей заготовки и изменением ее линейных размеров из-за теплового расширения пренебрегаем.

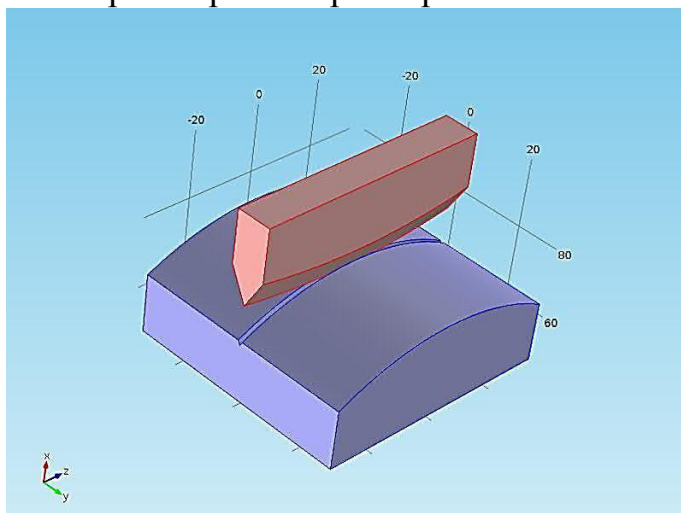


Рис.2 – Визуальная 3D-модель области взаимодействия участка шлифовального круга с заготовкой и расчетная схема для моделирования

Исходные данные для моделирования: материал круга – электрокорунд с зернистостью 240-280 для предварительного шлифования и 280-320- для окончательного; материал заготовки – сталь Х12М, твердость HRC 59-61, линейная скорость точек, принадлежащих режущей кромке круга – 35 м/с; линейная скорость точек, принадлежащих внешней поверхности заготовки – 0,2 м/с.

При моделировании зона контакта ШК и заготовки, выделенная на **Рис.3**, была представлена тепловым источником, мощность которого определялась по известной эмпирической формуле [1]:

$$Q = cV_k^{0,52}, \quad (1)$$

где c – теплоемкость материала круга, принятая равной 418,7 Дж/кг*К
 V_k - линейная скорость заготовки.

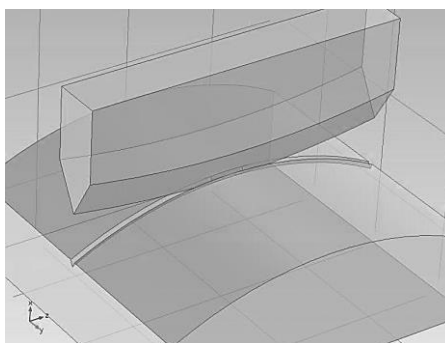


Рис.3 – Схема моделирования процесса шлифования предварительно проточенной резьбовой канавки

Мощность источника тепла Q , вычисленная по формуле (1), составляет 2660 Вт.

Выполнено сравнение протекания процесса при наличии и отсутствии принудительного охлаждения зоны резания.

При моделировании использована сетка из 53047 тетраэдральных конечных элементов, показанная на **Рис.4**.

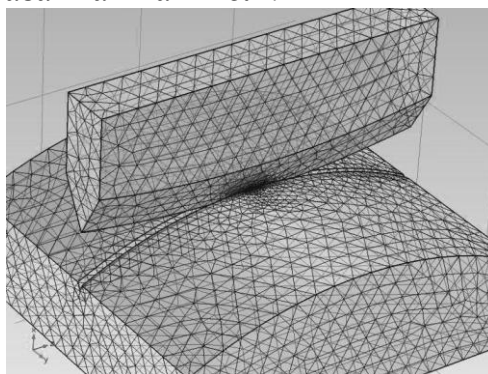


Рис.4 – Сформированная конечно-элементная сетка

Процесс теплообмена в рассматриваемом случае является нестационарным и зависит от времени контакта круга и заготовки [1,8]. При указанных выше значениях линейных скоростей точек круга и заготовки

время контакта составляет (0,03 - 0,04)с. Расчет был проведен для промежутка времени от 0 до 0,1с с интервалом 0,01с. Результаты для указанного времени взаимодействия показаны на **Рис.5,6**.

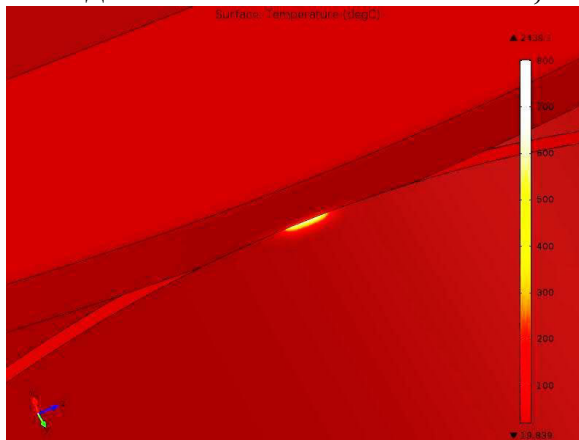


Рис.5 – Время обработки $t = 0,03$ с, $T_{\max} = 659$ °C

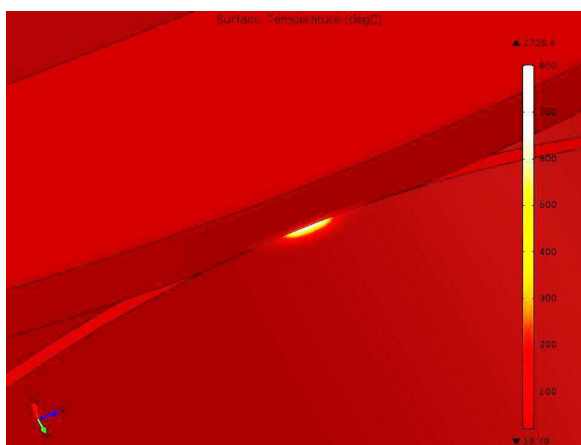


Рис.6 – Время обработки $t = 0,04$ с, температура в зоне контакта $T_{\max} = 858$ °C

Выводы. Из анализа результатов моделирования, представленных на **Рис.5,6** видно, что нарастание температуры в зоне контакта ШК с заготовкой происходит очень быстро, за 0,01 с почти на 200 °C, что приводит к прижогам, структурным превращениям в стали, снижению ее твердости, обезуглероживанию и возникновению микротрещин. Высокая стоимость заготовок резьбонакатных роликов, значительное влияние прижогов на надежность готовых инструментов обусловили необходимость выбора в инструментальном производстве оптимальных технологических режимов шлифования, исходя из максимизации производительности и предотвращения прижогов.

Построенная конечно-элементная модель позволяет осуществлять проверку предварительно вычисленных технологических режимов шлифования резьбовых поверхностей одноконтурным ШК, для предотвращения прижогов и оценки времени на выполнение операции, что

необходимо для параметрической оптимизации резбошлифовальной обработки.

Направление дальнейших исследований связано с оценкой влияния условий охлаждения и свойств ШК на тепловые процессы, происходящие при шлифовании резбовых поверхностей.

Библиографический список

1. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
2. Инженерия поверхности деталей /под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
3. Липка В.М., Рапацкий Ю.Л. Анализ воздействия технологической наследственности при изготовлении деталей с резьбой на надежность резбовых соединений в судовых машинах и механизмах // Ушаковские чтения: Материалы Пятой Межвузовской научно-практической конференции (Севастополь, 22-23 февраля 2018 г.). – Севастополь: ООО «ПК КИА», 2018. – С.61-69.
4. Рапацкий Ю.Л., Заморенов М.В., Копп В.Я., Обжерин Ю.Е. Анализ производительности и надежности технологических процессов в машиностроении на основе полумарковской модели. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. №1(333). С.22-33.
5. Rapatskiy Yu., Zamorenov M., Kopp V., Obzherin Yu., Gusev V., Lipka V. Research of reliability and efficiency of technological processes of mechanical assembly production on the basis of the common semi-Markov model // MATEC Web of Conferences 224, 01138 (2018), ICMTE 218 – P.1-8. DOI 10.1051/201822401138
6. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резьбонакатывание.: Библиотека технолога. - М.: Машиностроение, 2009.-312 с.
7. Петриков В.Г. Прогрессивные крепежные изделия / В.Г. Петриков, А.П. Власов; под ред. Петрикова В.Г. — М.: Машиностроение, 1991. — 256 с.
8. Фокин В.А., Дмитриев В.А. Трехмерное моделирование МКЭ нагрева внутреннего кольца подшипника при шлифовании дорожки качения// Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 18, № 4(2), 2016.- С.403-407.

Bibliograficheskiy spisok

1. Sipajlov V.A. Teplovyje processy pri shlifovanii i upravlenie kachest-vom poverhnosti. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 166 s.
2. Inzheneriya poverhnosti detalej /pod red. A.G. Suslova. – М.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s.
3. Lipka V.M., Rapackij YU.L. Analiz vozdejstviya tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri izgotovlenii detalej s rez'boj na nadezhnost' rez'bovyh soedinenij v sudovyh mashinah i mekhanizmah // Ushakovskie chteniya:

- Materials Pyatoj Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Sevastopol', 22-23 fevralya 2018 g.). – Sevastopol': ООО «PK KIA», 2018. – S.61-69.
4. Rapackij YU.L., Zamorenov M.V., Kopp V.YA., Obzherin YU.E. Analiz proiz-voditel'nosti i nadezhnosti tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii na osnove polumarkovskoj modeli. Fundamental'nye i prikladnye proble-my tekhniki i tekhnologii. 2019. № 1 (333). S. 22-33.
5. Rapatskiy Yu., Zamorenov M., Kopp V., Obzherin Yu., Gusev V., Lipka V. Research of reliability and efficiency of technological processes of mechanical as-sembly production on the basis of the common semi-Markov model // MATEC Web of Conferences 224, 01138 (2018), ICMTMTE 218 – P.1-8. DOI 10.1051/201822401138
6. Kirichek A.V., Afonin A.N. Rez'bonakatyvanie.: Biblioteka tekhnologa. - M.: Mashinostroenie, 2009.-312 s.
7. Petrikov V.G. Progressivnye krepezhnye izdeliya / V.G. Petrikov, A.P. Vlasov; pod red. Petrikova V.G. — M.: Mashinostroenie, 1991. — 256 s.
8. Fokin V.A., Dmitriev V.A. Trekhmernoe modelirovanie MKE nagreva vnutrennego kol'ca podshipnika pri shlifovanii dorozhki kacheniya// Izve-stiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, t. 18, № 4(2), 2016.- S.403-407.

¹*Копп Вадим Яковлевич, д-р техн. наук, проф., v_kopp@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

²*Леонтьев Вячеслав Владимирович, канд. техн. наук, доцент, VVLeontev@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

³*Липка Виктория Михайловна, старший преподаватель, lipka.vita@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

⁴*Рапакский Юрий Леонидович, канд. техн. наук, доцент, u.l.rapatskiy@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

**FINITE ELEMENT MODELING THERMAL PHENOMENA DURING
SINGLE-THREAD CIRCULAR GRINDING OF THREADS ON BARS OF
THREADED ROLLERS**

V.Ya. Kopp, V.V. Leontiev, V.M. Lipka, Yu.L. Rapatsky

The quality of fasteners with external threads for mechanical engineering and other industries is largely determined by the technological heredity in their manufacture. In particular, external defects of thread-rolling rollers are inherited

by the threaded surfaces rolled with their help. Thread-rolling is the most effective process for obtaining external threads, but the problem of manufacturing high-quality thread-rolling rollers has not been solved to date. A finite element model in the COMSOL Multiphysics environment is proposed to study thermal processes during the interaction of a single-line grinding wheel with a thread-rolling roller blank. The model makes it possible to estimate the temperature in the contact zone of the grinding wheel with the workpiece. The simulation results can be used to select the optimal modes for grinding threaded surfaces.

Keywords: thread grinding, heat processes, burns, thread rolling rollers

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

Vyacheslav Leontev, candidate of technical science, docent, VVLeontev@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Victoria Lypka, senior lecturer, lipka.vita@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Yuriy Rapatskiy, candidate of technical science, docent, u.l.rapatskiy@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ЭФФЕКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТНО- ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Доронина Е.Б.¹, Скатков А.В.²

***Аннотация.** При техническом обслуживании и ремонте сложных производственных систем наряду с регламентной последовательностью работ могут потребоваться и не регламентные варианты, реализующиеся в условиях недостатка ресурсов, в том числе по времени. В исследовании предложена схема системы поддержки принятия решений по выбору эффективной структуры технологического процесса с реструктурированием последовательности работ в условиях обслуживания сложных производственных комплексов. Применение системы поддержки принятия решений позволило снизить зависимость от необходимости привлечения высококвалифицированных кадров для принятия подобных решений при обслуживании сложных производственных систем.*

***Ключевые слова.** Производственная система, техническое обслуживание, система поддержки принятия решений, технологический процесс.*

В процессе технического обслуживания и ремонта, ремонтно-профилактических работ сложных производственных систем (РПР СПС), необходимо осуществить комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности или исправности объекта при его использовании по назначению, при ожидании, хранении и транспортировании; РПР СПС могут быть как плановыми (регламентированными), так и неплановыми (нерегламентными). В нормативной документации к типам СПС применяется различная трактовка и уточнение определений регламентных и других работ [1,2].

При определенных режимах функционирования СПС в технологическом процессе РПР может возникать неопределенность в связи с требованиями оперативности РПР или крайнего дефицита ресурсов. Эти факторы приводят в необходимости принимать решения по выбору эффективного варианта в условиях дефицита ресурсов, это влечет необходимость в высококвалифицированных кадрах, что не всегда возможно.

Таким образом, создание комплексной системы поддержки принятия решений, в том числе, по выбору эффективного варианта состава РПР, безусловно, актуальная задача.

Определим технологический процесс обслуживания СПС как процесс доведения ее параметров до значений, заданных в нормативно-технических

документах на основе достоверного определения и всесторонней оценки параметров, обслуживаемой СПС [3-6]. В связи с тем, что СПС представляют собой сложно структурированные, много компонентные комплексы гетерогенного типа, строгая регламентация, в определенных случаях затруднительна. В связи с этим автоматизация принятия решений по выбору приемлемого варианта процесса РПР оценки состояния СПС является актуальной.

Цель исследования - разработка схемы системы поддержки принятия решений по выбору эффективного варианта РПР СПС в нерегламентной ситуации.

Процесс классификации задачи реализуется путем соотнесения с базовыми директивно определенными образцами из конечного множества классов задач РПР. Процесс оценки качества результата решения задачи с использованием эффективного варианта РПР СПС (в котором осуществляется оценка выходных решений классифицированной задачи: проверка качества теста (на эталонном элементе), тестирование элемента (проверка, отладка, ремонт, профилактика), реализует процесс оценки качества выходных решений текущей задачи на основе учета отклонений выходных значений элемента производственной системы по прилагаемой справочной документации [7,8].

Исходя из того, что состав РПР Π_{NJ} представляет собой конечное множество операций (J) определенной длительности в некоторой последовательности, целесообразно рассматривать эффективность варианта Π_{NJ} как функцию времени $W(t_i)$, начиная с некоторого $W(t_0)$, где $t_0 < t_1$. В связи с тем, что в задаче определяются наилучшие варианты Π_{NJ} при заданных условиях, введем индексацию параметров составов ТП: $I_1, \dots, I_d; O_1, \dots, O_d; R_1, \dots, R_d$, где d – число вариантов Π_{NJ} (мощность множества вариантов составов работ ТОР), I – параметр информативности, O – параметр оперативности, R – затраченные ресурсы на выполнение РПР СПС.

В рассматриваемой задаче возможны случаи, когда для некоторого состава РПР предполагается, что монотонность не соблюдается по всем параметрам $I_i, O_i, R_i, i \in d$ одновременно, но при этом является характеристикой для некоторых из них. Тогда будем говорить о частичной (локальной) монотонности (ЛМ), например, для случаев:

$$W_{i+1}(I, \hat{I}_{i+1}, R_{i+1}) \geq W_i(I, \hat{I}_i, R_i), \text{ при } I_{i+1} = I_i; \quad (1)$$

$$W_{i+1}(I_{i+1}, \hat{I}, R_{i+1}) \geq W_i(I_i, \hat{I}, R_i), \text{ при } O_{i+1} = O_i; \quad (2)$$

$$W_{i+1}(I_{i+1}, \hat{I}_{i+1}, R) \geq W_i(I_i, \hat{I}_i, R), \text{ при } R_{i+1} = R_i. \quad (3)$$

Выражение (1) описывает ситуацию, когда ЛПР задает условия выбора оптимальной последовательности операций РПР при неизменной

информативности, т.е. без изменения энтропийной характеристики плана; выражение (2) описывает ситуацию, когда ЛПР формулирует условия выбора оптимального плана РПР при директивно заданных сроках выполнения плана. Для выражения (3) характерно то, что ЛПР задает условия выбора оптимального плана РПР при неизменном объеме ресурсов РПР СПС.

Анализируя случаи (1) – (3), можно сделать вывод о том, что выражение (1) наиболее близко отражает практическую ситуацию, в которой основными директивно заданными требованиями к эффективности плана РПР являются скорость и стоимость при изменяющейся информативности.

Формирование совокупности операций в плане реализуется на основе бинарного вектора $x = \langle x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1J} \rangle$, построенного на основе булевых переменных, равных единице, если осуществляется j -й вариант выполнения операций на n -м этапе, и равных нулю в противном случае:

$$\Pi_{NJ} = \langle x_{11} \cdot \text{Oper}1, x_{12} \cdot \text{Oper}2, \dots, x_{1N} \cdot \text{Oper}J \rangle. \quad (4)$$

В условиях, связанных с оперативным решением задач, или реализующих решения ЛПР, точный регламент работ (совокупность операций) не во всех случаях может быть осуществлен, что порождает неопределенность, вариативность и, как следствие – необходимость принятия решений по выбору варианта совокупности операций [1, 9-13].

В постановке многокритериальной оптимизации РПР СПС (МКО РПР СПС) решаются задачи принятия решений одновременно по нескольким критериям: h_{nj}, t_{nj}, c_{nj} , что соответствует ряду практических применений предложенного метода. Множество точек, удовлетворяющих системе, образует допустимую область $D \subset D^k$. Элементы множества D представляют собой допустимые варианты плана РПР СПС или альтернативы с критериями оценки, заданными на множестве D . В данной формулировке задачи (4) присутствует три критерия. Для удобства решения задачи поиска оптимальной последовательности РПР СПС на основе многокритериальной оптимизации возможно придать величинам I_v, O_v, R_v (I_v – метрика информативности v -го плана, O_v – метрика оперативности v -го плана, R – метрика ресурсов, необходимых для реализации РПР СТА по v -му плану) безразмерный вид:

$$\tilde{I}_v = \frac{I_i}{I_{\max}}, \quad \tilde{O}_v = \frac{O_i}{O_{\max}}, \quad \tilde{R}_v = \frac{R_i}{R_{\max}}. \quad (5)$$

Для визуализации принципа многокритериального оценивания варианта последовательности операций, с учетом (5), (1)-(3) построены рисунки, отражающие ситуации с фиксированными критериями и их группами при нахождении оценки варианта последовательности операций РПР СПС, **Рис.2.**

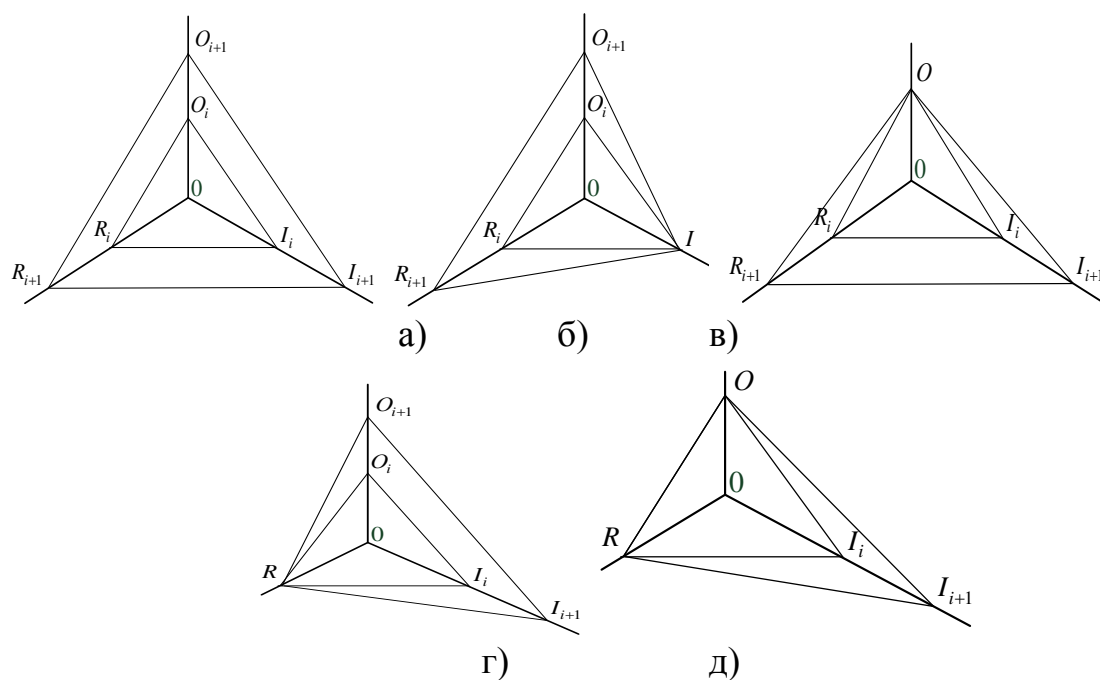


Рис.2 – Графическое представление критериальных пространств: а) визуализация случая полной монотонности параметров; б) – г) визуализации случаев, описанных выражениями (1) – (3) соответственно, в рамках частичной монотонности параметров; д) случай, отражающий ситуацию, в которой директивно заданы требования скорости и стоимости при изменяющейся информативности

На основе определенной в [14] меры, рассчитаны количественные оценки сходства сценариев, включающих наборы требуемых операций в некотором РПР СПС, с учетом введения операции, соответствующей условиям оперативного ремонта, **Рис.3.**

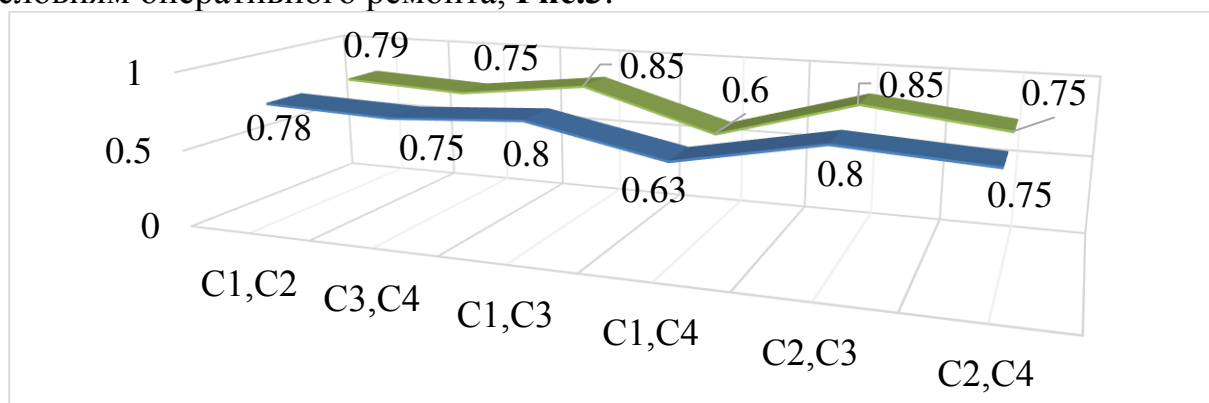


Рис.3 – Результаты расчёта мер сходства сценариев с введенной операцией (оперативный ремонт СПС)

Исходя из сравнения результатов, видно, что сходство сценариев С2 и С4 (С2 – оптимальный ремонт или диагностика, С4 – перечень операций, предложенный ЛПР) при изменении состава операций незначительно

изменяется. Внедрение ресурсоемкой операции в состав сценария незначительно меняет оценки мер сходства сценариев, и это не отражает действительность, поскольку, задаваемые ЛПР операции, могут значительно отличаться от выбранного сценария С2. Важность операций в оценке их сходства не учитывается, что значительно снижает применимость приведенных оценок [10].

Расчеты оценок включения одного сценария в другой на основе соответствия операций, показывают различные подходы к формированию сценариев: с полным или частичным включением операций в сценарий. Например, сценарий С4 полностью входит в сценарий С3, который соответствует полному набору операций. Сценарии С1 и С2 идентичны по входящим в них операциям (С1 – оперативный ремонт, соответствующий выбору базовых задач, а С2 соответствует оптимальной диагностике СТУ). Однако, в определенном случае С2 может иметь иной набор операций, что повлечет разницу в показателе включения. Таким образом, динамическое изменение состава операций в сценарии, задаваемого ЛПР, влечет за собой необходимость решения по возможному управлению этим процессом.

Для решения поставленной задачи предлагается формализовать схему процесса РПР СПС, с целью оптимизации существующего процесса, по критериям информативности I , оперативности O , R – затраченные ресурсы на выполнение РПР СПС, **Рис.4**.

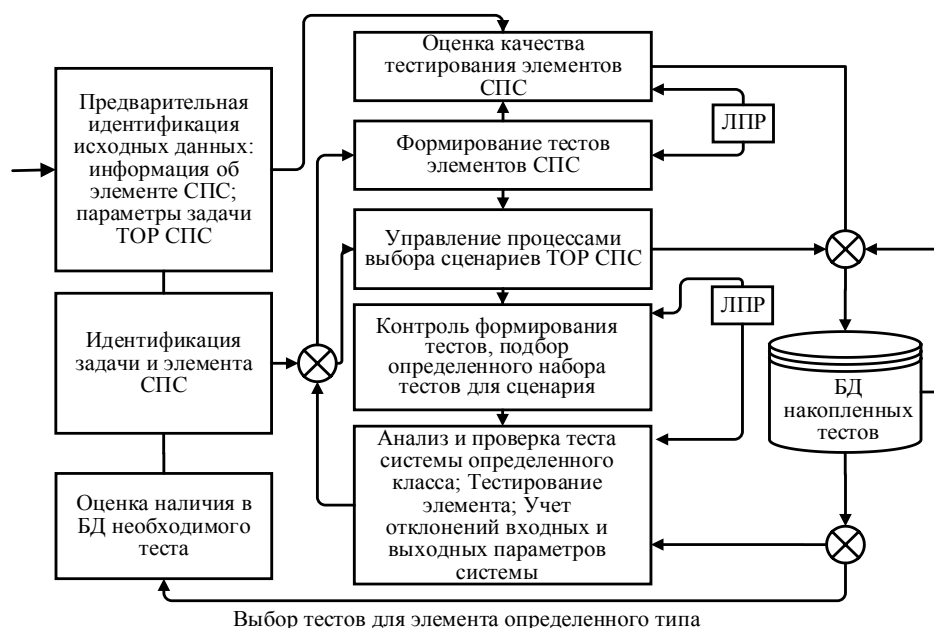


Рис.4 – Схема системы поддержки принятия решений по выбору эффективной структуры варианта технологического процесса ремонтно-профилактических работ производственной системы

Модификация осуществлена на основе введенной СППР с подпроцессом оценки параметров сходства (и включения) сценариев РПР СПС, появляется возможность снизить участие ЛПР и влияния опыта

сотрудников на принимаемые решения, например, вводить сценарий РПР СПС, который совпал по набору операций с отработанным, становится эквивалентным ему и организация работ по полученному сценарию не потребует дополнительных ресурсов. В другом случае, новый сценарий, значительно отличающийся от существующих, потребует временных и других ресурсов для внедрения.

Полученные результаты могут служить основой для развития процессов адаптации, накопления, проверки качества тестов РПР СПС.

Библиографический список

1. ГОСТ 18322-2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. (дата обращения: 15.03.2020).
2. Никифоров В.О., Слита О.В., Ушаков А.В. Интеллектуальное управление в условиях неопределенности: учебное пособие // СПб: СПбГУ ИТМО. 2011. 226 с.
3. Safari A., Eslamloueyan R. Controlled variables selection based on lost work minimisation // International Journal of Exergy. 2018. vol. 27. no. 3. pp. 334–363.
4. Арепин Ю. И., Смоляков А.А., Допира Р. В., Щербинко А. В. Построение АСУ инженерно-радиоэлектронным обеспечением ВМФ // Ремонт, восстановление, модернизация. Москва. 2006. № 4. С. 27-32.
5. Pequito S., Kar S., Aguiar A.P. A Framework for Structural Input/Output and Control Configuration Selection in Large-Scale Systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 2015. vol. 61. no. 2. pp. 303–318.
6. Алексеев В.В., Хоменко И.В., Прохорский Р.А. Модели планирования ремонтов и замен элементов в процессе жизненного цикла сложных технических систем // Вестник ВИ МВД России. 2011. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-planirovaniya-remontov-i-zamen-elementov-v-protsesse-zhiznennogo-tsikla-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 20.04.2020).
7. Аверченков В.И. Системы организационного управления: учеб. пособие [электронный ресурс] /В.И.Аверченков, В.В. Ерохин. – М.: Флинта, 2011. – 208с.
8. Бурков В. Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами. М.: Либро-ком, 2009. 264 с.
9. Винник А.И., Макаренко Н.Г., Шаргаев А.А. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта бронетанкового вооружения и техники // Вестник СибАДИ. 2016. №4 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-sistemy-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i-remonta-bronetankovogo-vooruzheniya-i-tehniki> (дата обращения: 20.11.2020).
10. Допира Р.В., Шароглазов В.Б., Ягольников Д.В., Архипов А.А., Керницкий А.Г. Метод планирования применения перспективных

средств войскового ремонта и технического обслуживания вооружения и военной техники противовоздушной обороны в зоне ответственности // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. №51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-planirovaniya-primeneniya-perspektivnyh-sredstv-voyskovogo-remonta-i-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-vooruzheniya-i-voennoy> (дата обращения: 20.11.2020).

11. Ягольников Д.В., Шароглазов В.Б., Григорашенко И.А., Филатов А.В. Методика построения и расчета интегрированной динамической сетевой модели процессов технического обслуживания и войскового ремонта образцов вооружения и военной техники воздушно-космических сил // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-postroeniya-i-rascheta-integrirovannoy-dinamicheskoy-setevoy-modeli-protsessov-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i-voyskovogo> (дата обращения: 20.11.2020).

12. Федотов А.В., Иванов П.С. Подход к построению имитационной модели системы технического обслуживания и ремонта военных приборов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-postroeniyu-imitatsionnoy-modeli-sistemy-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i-remonta-voennyh-priborov> (дата обращения: 20.11.2020).

13. Мартынов Д.В., Абу-абед Ф.Н., Кордюков Р.Ю., Сергиенко С.В. Имитационная модель оценки производительности ремонтно-диагностического комплекса // Программные продукты и системы. 2015. №1 (109). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-otsenki-proizvoditelnosti-remontno-diagnosticheskogo-kompleksa> (дата обращения: 20.11.2020).

14. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Методы и интеллектуальные системы принятия решений для проведения ФОРСАЙТ-исследований // Cloud of science. 2014. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-intellektualnye-sistemy-prinyatiya-resheniy-dlya-provedeniya-forsayt-issledovaniy> (дата обращения: 06.10.2020).

Bibliograficheskiy spisok

1. GOST 18322-2016 system of technical maintenance and repair of equipment. Terms and definitions. (accessed: 15.03.2020).
2. Nikiforov V.O., Slita O.V., Ushakov A.V. Intellectual management in conditions of uncertainty: textbook // SPb: ITMO state University. 2011. 226с.
3. Safari A., Eslamloueyan R. Controlled variables selection based on lost work minimisation // International Journal of Exergy. 2018. vol. 27. no. 3. pp. 334–363.
4. Arepin Yu. I., Smolyakov A. A., Dopira R. V., Shcherbinko A.V. Construction of an automated control system for engineering and radio-

- electronic support of the Navy // Repair, restoration, modernization. Moscow. 2006. No. 4. Pp. 27-32.
5. Pequito S., Kar S., Aguiar A. P. a Framework for Structural Input/Output and Control Configuration Selection in Large-Scale Systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 2015. vol. 61. no. 2. pp. 303–318.
6. Alekseev V. V., Khomenko I. V., Prokhorsky R. A. Models for planning repairs and replacements of elements in the life cycle of complex technical systems // VI Bulletin of the Ministry of internal Affairs of Russia. 2011. # 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-planirovaniya-remontov-i-zamen-elementov-v-protssesse-zhiznennogo-tsikla-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem> (accessed: 20.04.2020).
7. Averchenkov V. I. organizational management Systems: textbook. manual [electronic resource] / V. I. Averchenkov, V. V. Erokhin. - Moscow: flint, 2011. - 208s.
8. Burkov V. N., Korgin H. A., Novikovd. a. Introduction to the theory of management of organizational systems. M.: Libro-com, 2009. 264 p.
9. Vinnik A. I., Makarenko N. G., Shargaev A. A. Improving the system of maintenance and repair of armored weapons and equipment // SibADI Bulletin. 2016. No. 4 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-sistemy-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i-remonta-bronetankovogo-vooruzheniya-i-tehniki> (accessed: 20.11.2020).
10. Dopira R. V., Sharoglazov V. B., Yagolnikov D. V., Arkhipov A. A., Kernitsky A. G. Method of planning the use of advanced means of military repair and maintenance of weapons and military equipment of air defense in the area of responsibility // High-tech technologies in space research of the Earth. 2016. no. S1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-planirovaniya-primeneniya-perspektivnyh-sredstv-voyskovogo-remonta-i-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-vooruzheniya-i-voennoy> (accessed: 20.11.2020).
11. Yagolnikov D. V., Sharoglazov V. B., Grigorashchenko I. A., Filatov A.V. Methodology for constructing and calculating an integrated dynamic network model of maintenance and military repair processes for samples of weapons and military equipment of the air and space forces / / science-Intensive technologies in space research of the Earth. 2017. # 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-postroeniya-i-rascheta-integrirovannoy-dinamicheskoy-setevoy-modeli-protssessov-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i-voyskovogo> (accessed: 20.11.2020).
12. Fedotov A.V., Ivanov P. S. Approach to building a simulation model of the system of maintenance and repair of military devices // News Of Tulsu. Technical science. 2016. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-postroeniyu-imitatsionnoy-modeli-sistemy-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-i-remonta-voennyh-priborov> (date accessed: 20.11.2020).

13. Martynov D. V., Abu-Abed F. N., Kordyukov R. Yu., Sergienko S. V. Simulation model for evaluating the performance of a repair and diagnostic complex // Software products and systems. 2015. No. 1 (109). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-otsenki-proizvoditelnosti-remontno-diagnosticskogo-kompleksa> (accessed: 20.11.2020).
14. Andreychikov A.V., Andreychikova O. N. Methods and intelligent decision-making systems for conducting FORESIGHT research / / Cloud of science. 2014. no. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-intellektualnye-sistemy-prinyatiya-resheniy-dlya-provedeniya-forsayt-issledovaniy> (accessed: 06.10.2020).

¹Доронина Елена Борисовна, инженер-конструктор, doka0605@yandex.ru, Россия, Севастополь, СКБ «Меридиан», ГППП «Гранит», ВКО «Алмаз-Антей», аспирант НОЦ ВКО «Алмаз-Антей»,

²Скатков Александр Владимирович, д-р техн. наук, проф., AVSkatkov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CHOOSING AN EFFECTIVE STRUCTURE FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF REPAIR AND MAINTENANCE

E.B. Doronina, A.V. Skatkov

When maintaining and repairing complex production systems, along with the routine sequence of work, non-routine versions of the sequence of work may be required, which are implemented in conditions of lack of resources, including time. The study suggests the structure of a decision support system for choosing an effective structure of the technological process with the restructuring of the sequence of work in the conditions of servicing complex production complexes. The use of a decision support system has made it possible to reduce the dependence on the need to attract highly qualified personnel to make such decisions when servicing complex production systems.

Keyword: production system, maintenance, decision support system, technological process.

Doronina Elena Borisovna, Design Engineer, doka0605@yandex.ru, SKB "Meridian", GPTP "Granit", EKR "Almaz-Antey", post-graduate student of REC EKR "Almaz-Antey",

Skatkov Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, AVSkatkov@sevsu.ru, Sevastopol, Sevastopol State University

УДК 681.2.08

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Васютенко А.П.¹, Заморёнова Д.В.²

Аннотация. Приведено описание работы и структурная схема преобразования сигнала в пневмотерморезистивном преобразователе, сформулирована цель работы – определение метрологических характеристик на основе моделирования статических характеристик, описывающих зависимости по мощности и току измерительного устройства на базе терморезистивного преобразователя расхода и, связывающие между собой входные и выходные параметры с учётом конструктивных особенностей расходомера и измерительной оснастки первичного пневматического преобразователя.

Ключевые слова. Пневматический преобразователь, расходомер, моделирование, чувствительность, диапазон измерения, измерительное устройство.

Одним из важных направлений развития средств измерительной техники в машиноприборостроении является разработка приборов для измерения геометрических параметров деталей с использованием различных типов преобразователей. Анализ метрологических характеристик преобразователей показывает, что средства измерения, реализующие пневматический принцип измерения, обладают рядом существенных достоинств: малые габаритные размеры измерительной оснастки, позволяющие производить многопараметрический контроль в условиях ограниченных размеров рабочей зоны, нечувствительность к вибрациям, простота конструкции и надёжность работы [1-6].

Недостатком пневматических преобразователей является дискретный выходной электрический сигнал, который не позволяет производить обработку результатов измерения. В связи с этим представляется целесообразным исследовать метрологические характеристики комбинированного пневмоэлектрического прибора, описанного в работе [7], включающего в себя первичный пневматический преобразователь типа сопло-заслонка и расходомер на базе терморезистивного преобразователя.

Целью статьи является моделирование работы и определение чувствительности и диапазона измерения пневмотерморезистивного измерительного прибора.

Принцип действия прибора заключается в следующем. Изменение диаметра детали вызывает изменение расхода воздуха ΔG через терморезистивный расходомер, что приводит к изменению температуры Δt терморезистора, его сопротивления ΔR и, соответственно, изменению тока ΔI . Структурная схема преобразования сигнала измерительной информации показана на **Рис.1**.

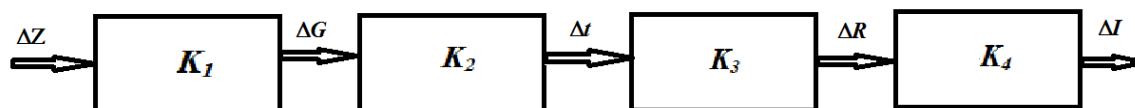


Рис.1 - Структурная схема преобразования сигнала

Общее передаточное отношение преобразователя равно:

$$K_{\text{общ}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 ,$$

где $K_1 = \Delta G / \Delta z$ – передаточное отношение первичного пневматического преобразователя типа «сопло-заслонка»; $K_2 = \Delta t / \Delta G$ – передаточное отношение переноса тепловой энергии потоком воздуха; $K_3 = \Delta R / \Delta t$ – передаточное отношение терморезистора; $K_4 = \Delta I / \Delta R$ – передаточное отношение измерительного моста.

Схема прибора, реализующего пневмотерморезистивный принцип измерения (**Рис.2**), и выражения, описывающие зависимости тепловой мощности W и тока I от зазора между измерительным соплом и заслонкой имеют вид [7]:

$$W = \left(\frac{b \cdot \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi \cdot d_2 z \cdot \varepsilon_2}{\rho_2}} \cdot \sqrt{2 \rho_2 P}}{\sqrt{F}} + a \right) \cdot (T_{II} - T_C) \cdot l ,$$

$$I = \sqrt{\frac{\left(\frac{b \cdot \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2 z \varepsilon_2}{\rho_2}} \cdot \sqrt{2 \rho_2 P}}{\sqrt{F}} + a \right) \cdot (T_{II} - T_C) \cdot l}{R}} ,$$

где T_C – температура среды; T_{II} – температура нагревательного элемента (проволоки); $a = \lambda$; $b = (2 \pi r c d)^{0,5}$; λ , ρ , c – коэффициент теплопроводности, плотность и теплоёмкость газа; d – диаметр проволоки нагревательного элемента; α_2 – коэффициент расхода воздуха; ε_2 – коэффициент, учитывающий изменения плотности воздуха при прохождении через пневмосопротивление; F – площадь поперечного сечения канала расходомера.

При моделировании статических характеристик $W=f(z)$ и $I=f(z)$ пневмотерморезистивного прибора рассматривались различные сочетания рабочего давления воздуха $P=0,1; 0,15; 0,2$ МПа, длины $l=0,5..10$ мм, диаметра $d=0,005... 3,0$ мм проволоки нагревательного элемента, и температуры воздуха $t_c=10; 20; 30$ °С. На **Рис.2,3** показаны зависимости $W=f(z)$ и $I=f(z)$ для рабочих давлений воздуха $P=0,1, 0,15, 0,2$ Мпа, температуры воздуха $t_c=20$ °С и размеров нагревательного элемента $l=1$ мм $d=0,1$ мм.

Колебания температуры воздуха, подаваемого в измерительную ветвь прибора, незначительно влияют на характеристики по мощности и току, т.к. они составляют менее 1,7% от температуры нагревательного элемента.

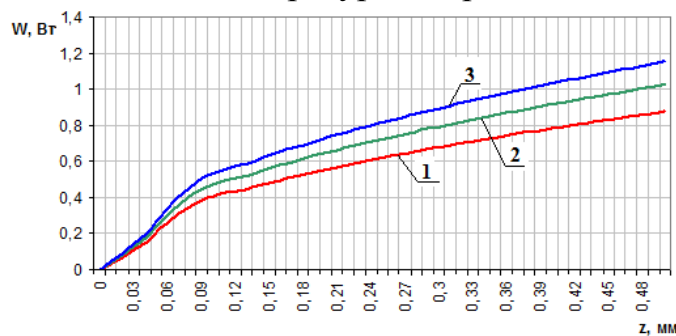


Рис.2 – Графики зависимости $W=f(z)$ при: 1 – $P=0,1$ МПа; 2 – $P=0,15$ МПа; 3 – $P=0,2$ МПа

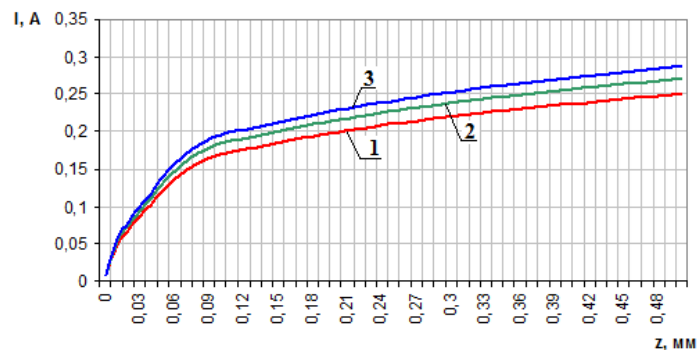


Рис.3 – График зависимости $I=f(z)$ при: 1 – $P=0,1$ МПа; 2 – $P=0,15$ МПа; 3 – $P=0,2$ МПа

Анализ графиков (**Рис.2,3**) позволяет выделить два участка с различной чувствительностью и определить значения диапазонов измерения и чувствительности. В таблице 1 показаны значения метрологических характеристик: диапазонов измерения ΔZ , тепловой мощности ΔW и чувствительности $K = \frac{\Delta W}{\Delta Z}$ для первого и второго прямолинейных участков.

На **Рис.4** показаны зависимости чувствительности от величины рабочего давления воздуха $K=f(P)$ для первого и второго прямолинейных участков характеристики $W=f(z)$.

Таблица 1 – Значения метрологических характеристик ΔZ , ΔW , K

Метрологич. хар-ка	Рабочее давление, МПа	Участок 1	Участок 2
ΔZ , мм	0,1	0,6	0,38
	0,15	0,7	0,38
	0,2	0,8	0,38
ΔW , Вт	0,1	0,18	0,29
	0,15	0,23	0,39
	0,2	0,25	0,5
K , Вт/мм	0,1	4,4	1,2
	0,15	4,7	1,4
	0,2	5,8	1,6

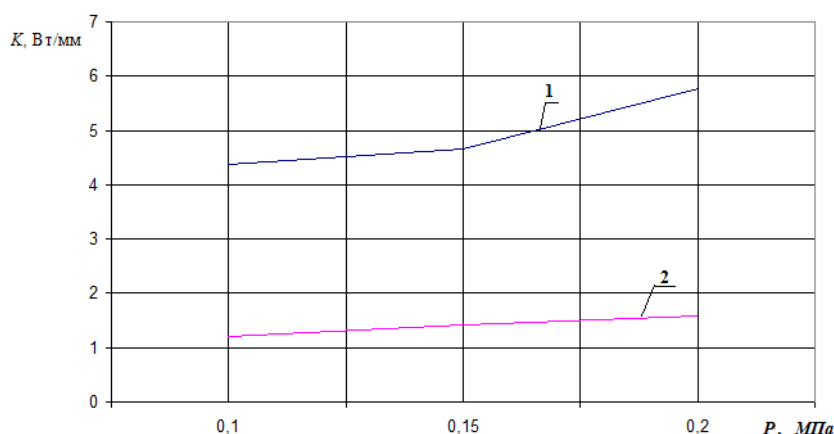


Рис.4 – График зависимости $K=f(P)$

Выводы.

Анализ результатов моделирования работы прибора на базе пневмотерморезистивного преобразователя позволяет выделить два линейных диапазона характеристики $W=f(z)$: с высокой чувствительностью (участок 1) и широким диапазоном измерения (участок 2). Первый участок характеристики может быть рекомендован для проведения точных измерений, т.к. чувствительность на нем составляет $K=4,4 \dots 5,8$ Вт/мм, что в 3,5 раза выше чувствительности на втором участке.

Участок 2 обеспечивает более широкий диапазон измерения, который составляет $\Delta Z=0,38$ мм и может быть увеличен за счёт увеличения диаметра измерительного сопла d_2 , который ограничивается максимальным значением расхода воздуха стабилизатора рабочего давления. Например,

при диаметре измерительного сопла $d_2=4$ мм диапазон измерения будет равен $\Delta Z=0,8 \dots 1,0$ мм.

Исследуемые преобразователи могут использоваться в приборах, являющихся основой информационно-измерительных систем, применяемых при осуществлении процесса селективного комплектования и сборки сложных изделий машино- приборостроения.

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

Библиографический список

1. Ахмеджанов Р.А. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Ахмеджанов Р.А., Чередов А.И – Электрон. текстовые данные.— М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013.— 212 с.
2. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебн. пособие Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.
3. Пневматические устройства и системы в машиностроении. Справочник /А.И. Рабинович.-К.:Техника, 1970.- 396с.
4. Кремлевский П.П. Измерение расхода и количества жидкости , пара и газа/ П.П. Кремлевский . –М.: Изд-во стандартов, 1980г.-192с.
5. Легаев, В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. Пособие / В. П. Легаев; Владим. Гос. Ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009.–123 с.
6. Этингоф, М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках: [текст] / М.И. Этингоф – М.: АПР, 2016.–336 с.
7. Васютенко А.П. Пневматический прибор на базе терморезистивного расходомера / А.П. Васютенко. - Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. Научный журнал выпуск №4(8) – Брянск, 2019.– С.57-63.

Bibliograficheskij spisok

1. Ahmedzhanov R.A. Fizicheskie osnovy polucheniya informacii [Elektronnyj resurs]: uchebnoe posobie/ Ahmedzhanov R.A., CHeredov A.I – Elektron. tekstovye dannye.— М.: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte, 2013.— 212 s.
2. Gol'dshtejn A.E. Fizicheskie osnovy izmeritel'nyh preobrazovanij: uchebn. posobie Tomsk: Izd-vo TPU, 2008. – 253 s.
3. Pnevmaticheskie ustrojstva i sistemy v mashinostroenii. Spravochnik /A.I. Rabinovich.-K.:Tekhnika, 1970.- 396s.
4. Kremlevskij P.P. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti , para i gaza/ P.P. Kremlevskij . –М.: Izd-vo standartov, 1980g.-192s.

5. Legaev, V.P. Pribory avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya v mashinostroenii: ucheb. Posobie / V. P. Legaev; Vladim. Gos. Un-t. – Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009.–123 s.
6. Etingof, M.I. Avtomaticheskij razmernyj kontrol' na metallovezhushchih stankah: [tekst] / M.I. Etingof – M.: APR, 2016.–336 s.
7. Vasyutenko A.P. Pnevmaticheskij pribor na baze termorezistivnogo raskhodomera / A.P. Vasyutenko. - Avtomatizaciya i izmereniya v mashinopriborostroenii. Nauchnyj zhurnal vypusk №4(8) – Bryansk, 2019.– S.57-63.

¹*Васютенко Александр Павлович, канд. техн. наук, доцент, vasutenko50@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Заморёнова Дарья Викторовна, канд. техн. наук, доцент, zamik@ukr.net, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

SIMULATION OF STATIC CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC RESISTIVE MEASURING DEVICE

A.P. Vasyutenko, D.V. Zamoryonova

A description of the work and a block diagram of signal conversion in a pneumo-thermo-resistive transducer are given, the goal of the work is formulated - the determination of metrological characteristics based on modeling static characteristics describing the power and current dependences of a measuring device based on a thermoresistive flow transducer and connecting the input and output parameters taking into account the design features of the flow meter and measuring equipment of the primary pneumatic converter.

Keywords: pneumatic transducer, flow meter, simulation, sensitivity, measuring range, measuring device.

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

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

УДК 616-072.1

ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА АВТОНОМНОЙ ЭНДОСКОПИЧЕСКОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ

Майстришин М.М.¹, Филипович О.В.², Гарматюк М.И.³, Салиенко А.В.⁴

Аннотация. Рассматривается применение видеоэндоскопических систем медицинского назначения и возможные направления, связанных с совершенствованием их конструкций. В рамках проектирования универсальной автономной эндоскопической видеосистемы описывается решение задач синтеза структурной схемы, разработки конструкции и анализ ее элементов. Приведена структурная схема системы, имеющей блочно-модульное построение, а также модель ее сборки. Описаны процессы проектирования кнопочной панели и моделирования температурных режимов светодиодного осветителя. Приведены области возможного применения видеосистемы и ее отличия от аналогов.

Ключевые слова. Эндоскоп, видеосистема, проектирование, анализ.

Эндоскопическая хирургия – одно из перспективных направлений в современной медицине, развитие которой нуждается в разработке и применении современных систем визуального контроля и наблюдения. Эндоскопами называют группу сложных оптико-механических и оптико-электронных приборов, выполняющих различные функции и задачи [1,2]. Данные приборы подразделяются на два класса: технические и медицинские. Технические эндоскопы используются для осмотра труднодоступных элементов машин и оборудования при их техническом обслуживании и оценке работоспособности, а также в системах безопасности для досмотра скрытых полостей. Согласно [3] под медицинским эндоскопом понимают прибор, вводимый во внутренние полости и органы человека через естественные каналы или хирургическим путем. Медицинские эндоскопы используются для исследования и лечения внутренних органов человека, а также брюшной и других полостей тела.

Выполнение эндохирургических операций требует специального, достаточно сложного и дорогостоящего оборудования и инструментария, одним из основных элементов которого является видеосистема, состоящая из видеокамеры, подсистемы обработки видеoinформации и монитора. В современной малоинвазивной хирургии ключевую роль играет возможность интеграции современного хирургического оборудования с новейшими методами визуализации операционного поля. Использование современных средств визуального контроля во время операции позволяет существенно снизить погрешности человеческого фактора, гарантировать точность движений. Кроме этого, средства видеоэндоскопии могут стать частью интегрированной multifunctionальной операционной, позволяющей выполнять хирургическую диссекцию тканей на высочайшем уровне визуального контроля,

иметь доступ всей необходимой клинической информации о пациенте в любое время в течение всей операции и возможность удаленного наблюдения за ходом вмешательства, например, с целью обеспечения контроля хирургического вмешательства экспертами, находящимися вне операционной комнаты.

Применение малоинвазивных и эндохирургических методов лечения является основой современной концепции в медицине «Хирургия одного дня»: оказание максимально качественных медицинских услуг при минимальных временных затратах [4,5]. При этом время, потраченное пациентом на обследование, сокращается до одного часа, а время проведения операции и реабилитации – до одного дня.

подавляющее большинство эндохирургических операционных в России оснащены импортным оборудованием. Эквивалентная замена импортного оборудования отечественным при адекватной ценовой политике и неизменным требованиям к качеству и безопасности является актуальной задачей.

Одними из возможных направлений, связанных с совершенствованием конструкций эндовидеосистем медицинского назначения, является:

- автономность: разработка универсального модуля, имеющего при определенных условиях возможность интеграции с уже установленным в операционных блоках оборудованием;

- использование в модуле блока, имеющего возможность осуществления беспроводной передачи информации на внешнее устройство отображения.

Данная работа посвящена проектированию универсальной автономной эндоскопической видеосистемы медицинского назначения, которая должна выполнять следующие основные функции.

1. Проецирование изображения с видеокамеры на монитор.
2. Передача видеосигнала по беспроводному и проводному каналам.
3. Настройка режимов работы.
4. Запись видеоизображения и фотоснимка на внешний носитель информации.

Предполагается решить ряд взаимосвязанных задач:

- 1) синтез структурной схемы с учетом специфики функционирования и применения;
- 2) разработка конструкции;
- 3) инженерный анализ и расчет;
- 4) изготовление и покупка комплектующих;
- 5) сборка и настройка видеосистемы;
- 6) развертывание программного обеспечения;
- 7) тестирование.

Остановимся подробно на первых трех. Структурная схема видеосистемы показана на **Рис.1**.

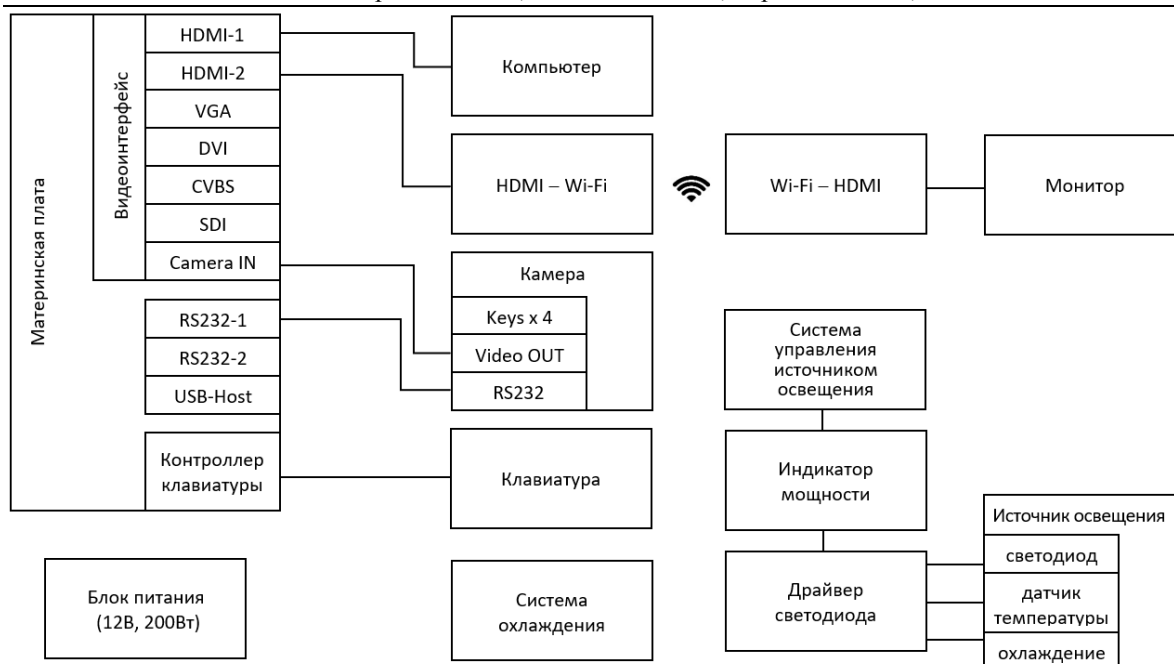


Рис.1 – Структурная схема видеосистемы

Разрабатываемую видеосистему функционально можно разделить на два независимых блока: блок подсветки, блок обработки и вывода видеосигнала.

Блок подсветки позволяет освещать рабочее место с помощью мощного светодиода, управление которым осуществляется с помощью специального драйвера (LED-драйвера). LED-драйвер управляет мощностью светодиода, а также обеспечивает его охлаждение, регулируя режимы работы вентилятора в зависимости от показания термодатчика. Мощность подсветки задается пользователем, ее значение может отображаться на индикаторном устройстве. Световой поток от источника освещения в рабочую зону передается по световоду.

Блок обработки и вывода видеосигнала осуществляет вывод изображения, полученного с камеры на монитор. Он позволяет подстраивать качество изображения (оттенки цвета, яркость, увеличение и т.п.) для более удобного наблюдения, а также сохранять фото и видео во время работы с прибором. Для получения изображения используется цифровая камера, которая имеет четыре кнопки управления («заморозка» изображения, управление яркостью, автоматический баланс белого – AWB). Камера управляется по последовательному интерфейсу RS232. Видеосигнал передается и обрабатывается материнской платой, выполненной на высокоскоростном ARM контроллере. Она поддерживает цифровой и аналоговый видеоинтерфейс для вывода видеосигнала: HDMIx2, VGA, DVI, CVBS, SDI, видеовход для камеры. На материнской плате размещен порт для подключения кнопочной клавиатуры. Для сохранения изображения и видео используется USB интерфейс, к которому подключается внешний носитель данных.

Для беспроводной передачи сигнала от автономного модуля к монитору используется беспроводной HDMI, позволяющий передачу мультимедийного сигнала высокой чёткости по радиоканалу (Wi-Fi). Дальность передачи без

усиления может достигать 15 метров.

Кнопки управления выполнены отдельным модулем, который подключается шлейфом к материнской плате. Для вывода теплого воздуха из корпуса прибора применяется активное охлаждение. Питание прибора осуществляется блоком питания 12 В 200 Вт.

3-D модель сборки автономного модуля, выполненная в среде Autodesk Inventor [6-8], показана на **Рис.2**.



Рис.2 – Модель сборки модуля

Подробно рассмотрим процесс проектирования одного из элементов системы – кнопочной панели, представляющей собой печатную плату (ПП). Для производства печатных плат наиболее широкое распространение получили такие сервисы как JLCPCB [9] и PCBWay [10]. Первый имеет и собственную онлайн среду разработки плат EasyEDA, в которой можно создать схему, развести печатную плату, заказать компоненты и их установку, запустить в производство.

Для запуска производства ПП разрабатывались Gerber RS-274X и Excellon N/C Drill файлы. Gerber – универсальный файловый формат, который описывает проект ПП для изготовления фотошаблонов на самом разнообразном оборудовании. Файл N/C Drill описывает параметры всех отверстий на плате.

Рассмотрим процесс создания Gerber-файлов для платы кнопочной панели, разработанной в среде DipTrace 4. Разработана схема ПП (**Рис.3**), выполнена разводка верхней и нижней стороны ПП (**Рис.4**) и 3D-модель платы (**Рис.5**) для дальнейшего проектирования в среде Autodesk Inventor. Все файлы создаются в программе PCB Layout из пакетов DipTrace.

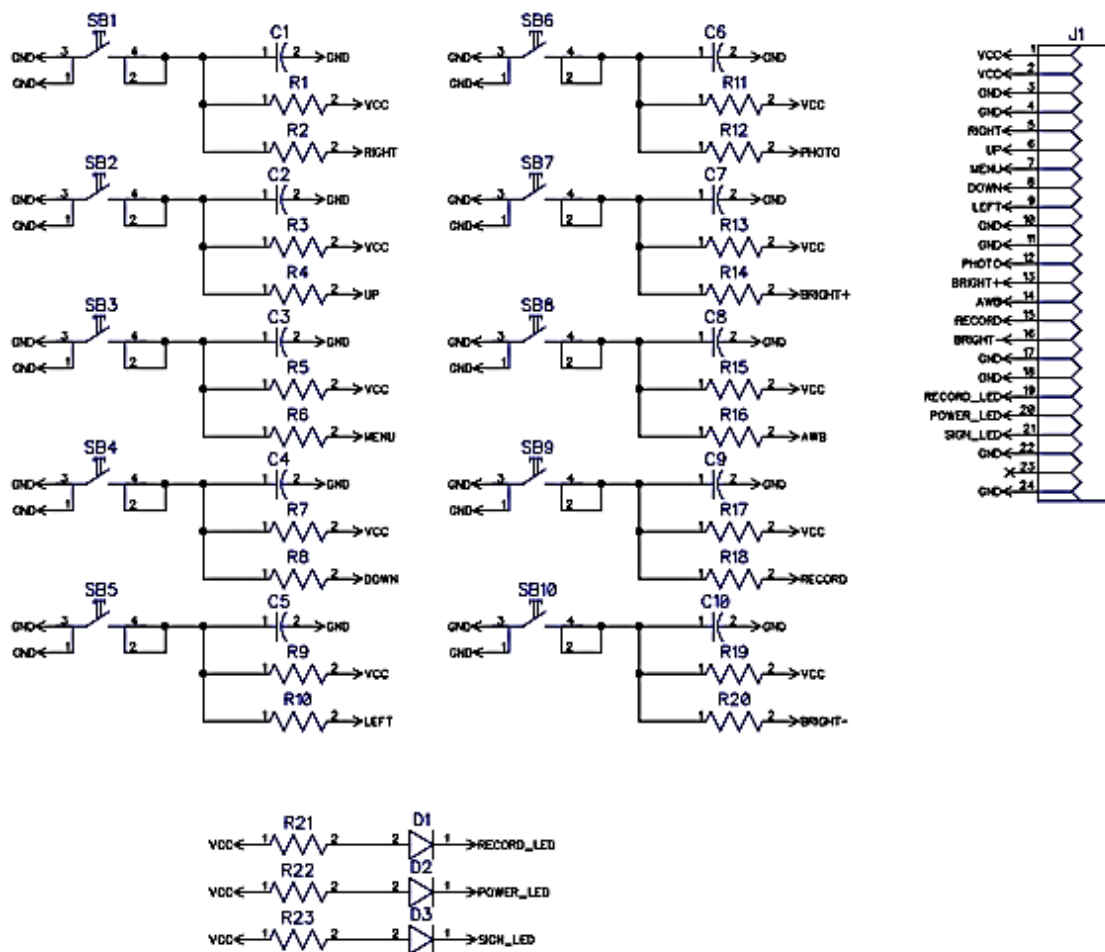


Рис.3 – Схема электрическая принципиальная

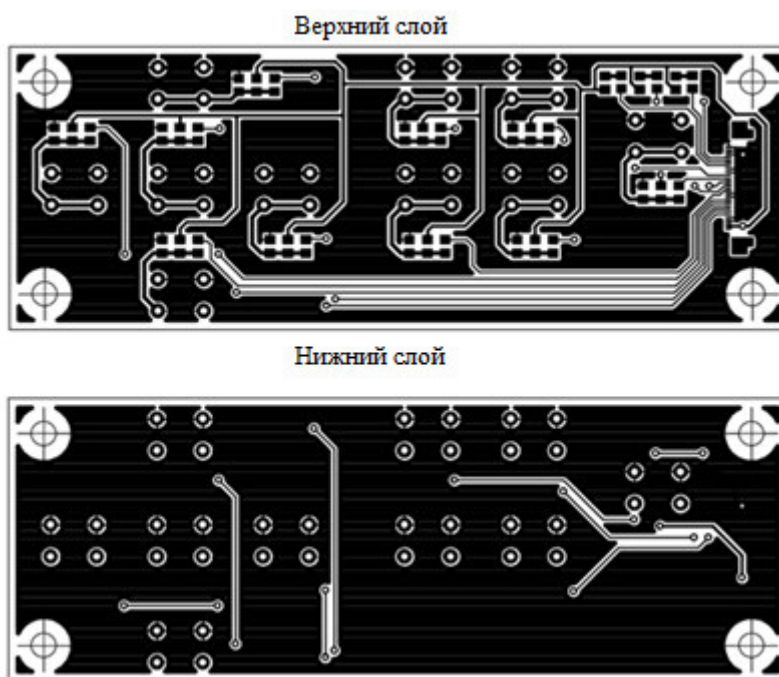


Рис.4 – Разводка верхнего и нижнего слоя ПП
(обозначение элементов отключено)

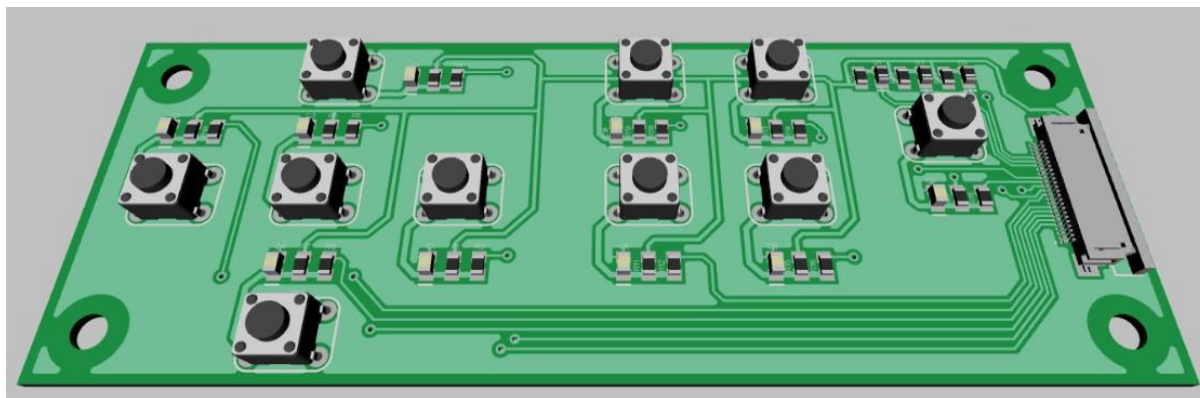


Рис.5 – 3D модель ПП

Формат подразумевает, что каждый слой платы помещается в отдельный файл. Далее плата проверяется на наличие ошибок. Если ошибки отсутствуют, то проверяется расстановка и разводка элементов согласно техническому заданию и только затем производится экспорт Gerber файлов.

Один из основных элементов источника освещения – светодиод – генерирует в процессе работы большое количество тепла, которое необходимо отводить. Условиями, ограничивающими физические возможности отвода тепла, являются предельно допустимая температура чипа и максимальный уровень генерируемого тепла на единицу площади [11]. Система охлаждения, предназначенная для отвода тепла, является одним из основных элементов источника освещения, во многом определяющим его надежность и долговечность. Существующие в настоящий момент системы охлаждения принято разделять на две основные группы: пассивные и активные. Для пассивных методов характерен естественный путь отвода тепла – конвекцией, теплопроводностью и излучением. В активных методах используется принудительный теплоотвод с применением вентиляторов, термоохладителей или омывающих жидкостей.

Рассмотрим наиболее простой способ охлаждения светодиода осветителя – пассивный с применением радиаторов. Модель такого устройства в сборе показана на **Рис.6**. Габариты радиатора выбраны конструктивно, материал радиатора – алюминиевый сплав А6.

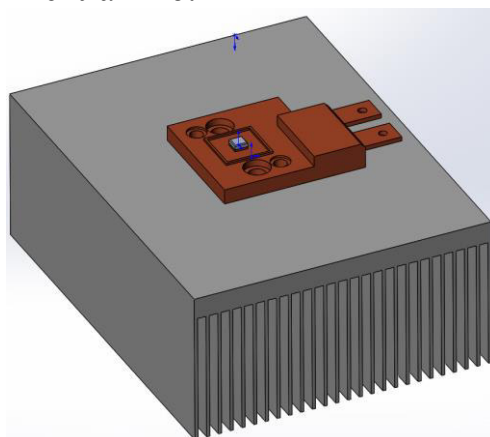


Рис.6 – 3D модель сборки светодиода и радиатора

Исследование температурных режимов проводилось в среде SOLIDWORKS Flow Simulation, предназначенной для моделирования потоковых процессов (CFD-анализ), полностью встроенной в SOLIDWORKS [12]. Построенная модель позволяет произвести анализ распределения температуры в системе охлаждения (**Рис.7**). По результатам моделирования вырабатывались рекомендации по улучшению теплового режима и выбору рационального способа охлаждения.

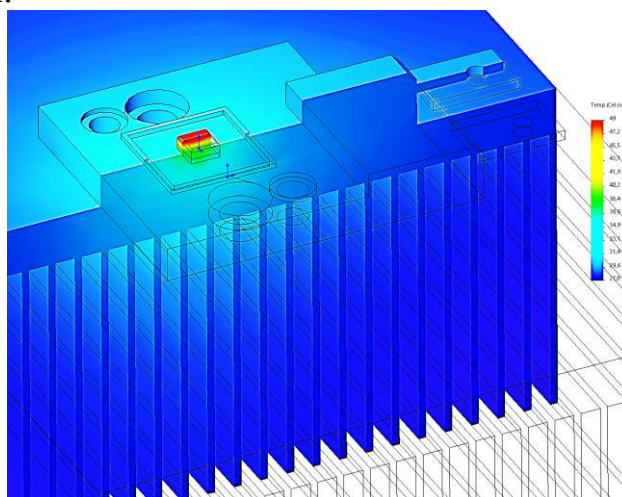


Рис.7 – Распределение температурного поля в сечении

На основании разработанной конструкторской документации и результатов инженерного анализа в настоящее время изготовлены и заказаны комплектующие, произведена сборка опытного образца видеосистемы. От зарубежных аналогов она отличается компактностью и возможностью использования различных способов передачи видеосигнала.

Такая система оптимально подходит как для применения в стационаре в составе операционного эндоскопического комплекса, так и для использования на выездах или для быстрого перемещения среди нескольких приемных кабинетов.

Научная работа была выполнена в рамках внутреннего гранта ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ID 36/06-31.

Библиографический список

1. Хацевич Т.Н. Эндоскопы: учеб. пособие / Т.Н. Хацевич, И.О. Михайлов. – 2-е изд., доп. и расш. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 260 с.
2. Увидеть невидимое: Сб. науч. тр. / Под. ред. А. И. Мазурова – СПб.: «Книжный Дом», 2008. – 352 с.
3. ГОСТ 18305-83. Эндоскопы медицинские. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 18 с.
4. Каташева Д.Н. Развитие амбулаторной хирургии /Д.Н. Каташева, Л.С. Ермуханова //Вестник Казахского Национального медицинского университета. - №1, 2016. – С.714-716.
5. Кутин А.А. Однодневная хирургия: Клинико-организационные аспекты / А.А. Кутин, Н.И. Мосиенко. – М.: Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2000. – 265с.

6. Концевич В. Твердотельное моделирование в Autodesk Inventor /В. Концевич. – М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2008. – 672 с.
7. Банах Д. Autodesk Inventor /Д. Банах, Т. Джонс, А. Каламейя; пер. И. Кожинной. – М.: Изд-во Лори, 2019. – 732 с.
8. Зиновьев, Д.В. Основы проектирования в Autodesk Inventor 2016 / Д.В. Зиновьев; под редакцией М. Азанова. – 2-е изд. – Москва: ДМК Пресс, 2017. – 256 с.
9. PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer - JLCPCB: [сайт]. URL: <https://jlcpcb.com>.
10. PCB Prototype the Easy Way: [сайт]. URL: <https://www.pcbway.com>.
11. Колпаков А. Охлаждение в системах высокой мощности /А. Колпаков //Силовая электроника. – № 3, 2010. – С. 62-66.
12. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи /А.А. Алямовский. – BHV, 2012. – 445 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Hacevich T.N. Endoscopy: ucheb. posobie / T.N. Hacevich, I.O. Mihajlov. – 2-е изд., dop. i rassh. – Novosibirsk: SGGA, 2012. – 260 s.
2. Uvidet' nevidimoe: Sb. nauch. tr. / Pod. red. A. I. Mazurova – SPb.: «Knizhnyj Dom», 2008. – 352 s.
3. GOST 18305-83. Endoscopy medicinskie. Terminy i opredeleniya. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1984. – 18 s.
4. Katasheva D.N. Razvitie ambulatornoj hirurgii /D.N. Katasheva, L.S. Ermuhanova //Vestnik Kazahskogo Nacional'nogo medicinskogo universiteta. - №1, 2016. – S.714-716.
5. Kutin A.A. Odnodnevnyaya hirurgiya: Kliniko-organizacionnye aspekty / A.A. Kutin, N.I. Mosienko. – M.: Izd-vo Ros. un-ta druzhby narodov, 2000. – 265s.
6. Koncevich V. Tverdotel'noe modelirovanie v Autodesk Inventor /V. Koncevich. – M.: Izd-vo DМК-Press, 2008. – 672 s.
7. Banah D. Autodesk Inventor /D. Banah, T. Dzhons, A. Kalamejya; per. I. Kozhinoj. – M.: Izd-vo Lori, 2019. – 732 s.
8. Zinov'ev, D.V. Osnovy proektirovaniya v Autodesk Inventor 2016 / D.V. Zinov'ev; pod redakciej M. Azanova. – 2-е изд. – Moskva: DМК Press, 2017. – 256 s.
9. PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer - JLCPCB: [sajt]. URL: <https://jlcpcb.com>.
10. PCB Prototype the Easy Way: [sajt]. URL: <https://www.pcbway.com>.
11. Kolpakov A. Ohlazhdenie v sistemah vysokoj moshchnosti /A. Kolpakov //Silovaya elektronika. – № 3, 2010. – S. 62-66.
12. Alyamovskij A.A. SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi /A.A. Alyamovskij. – BHV, 2012. – 445 с.

¹Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц., mihail.maystrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

²Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, ophisl@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Гарматюк Михаил Игоревич, старший научный сотрудник, m-krym@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁴Салиенко Артур Витальевич, студент, salienko1999@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

STAGES OF DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF AN AUTONOMOUS ENDOSCOPIC VIDEO SYSTEM

M.M. Maistrishin, O.V. Filipovich, M.I. Garmatyuk, A.V. Salienko

The use of video endoscopic systems for medical purposes and possible directions associated with the improvement of their designs are considered. Within the framework of the design of a universal autonomous endoscopic video system, the solution of the problems of synthesizing a structural diagram, developing a structure and analyzing its elements is described. The block diagram of a block-modular system and a model of its assembly are presented. The processes of designing the keypad and modeling the temperature conditions of the LED illuminator are described. The areas of possible application of the video system and its differences from analogues are given.

Keywords: endoscope, video system, design, analysis

Maistrishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, mihail.maistrishin@gmail.com Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

Filipovich Oleg Viktorovich, candidate of technical sciences, associate professor, Russian Federation, Sevastopol, Sevastopol State University

Garmatyuk Mikhail Igorevich, senior researcher, m-krym@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Salienko Artur Vitalievich, student, salienko1999@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ПЕРЕНОСНОЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Круговой А.Н.¹

Аннотация. При проведении мероприятий по сердечно-легочной реанимации к грудной клетке человека прикладывают усилия заданной частоты, для создания которых применяют пневматические или электрические приводы. В экстремальных условиях требуется наличие переносного устройства, имеющего автономный источник питания. Использование баллона со сжатым воздухом существенно увеличивает общую массу устройства, поэтому целесообразно применять электрический привод, а в качестве источника питания использовать аккумуляторную батарею. Для обеспечения заданных циклических воздействий электрический двигатель должен работать в режиме постоянных реверсов, что не характерно для большинства двигателей. Проанализирована возможность использования различных типов электрических двигателей, создана и испытана масштабная установка для создания реанимационных усилий на базе шагового привода.

Ключевые слова. Электрический двигатель, реверс, циклические усилия, сердечно-легочная реанимация, воздушные микронасосы.

Сердечно-лёгочная реанимация (СЛР) – это комплекс неотложных мероприятий, направленных на восстановление жизнедеятельности организма и выведение его из состояния клинической смерти. Она включает компрессии грудной клетки (непрямой массаж сердца) на глубину 5...6 см с частотой 100...120 нажатий в минуту и искусственную вентиляцию лёгких (искусственное дыхание). Соотношение компрессий и вдохов должно быть 30 к 2 для взрослых [1].

СЛР, как правило, не приводит к восстановлению работы сердца. Её главная цель – восстановить частичный поток насыщенной кислородом крови к мозгу и сердцу, чтобы отсрочить омертвление тканей. Для восстановления нормального сердечного ритма требуется дефибрилляция [2].

Сердечно-легочная реанимация необходима при кратковременной остановке сердца, которая может произойти в медицинских, производственных, бытовых и полевых условиях. Для восстановления сердечно-легочной деятельности необходимо наличие малогабаритного автоматического устройства, которое в течение малого промежутка времени должно быть подключено к человеку для начала реанимационных действий.

Устройство должно обеспечивать автоматическое переключение между режимами непрямого массажа и искусственной вентиляции в заданном цикле, иметь систему управления и автономный источник энергии и иметь возможность подключения к источнику энергии транспортного средства или электрической сети. Устройство должно обеспечивать выполнение заданного цикла силового нагружения грудной клетки и подачи воздуха в легкие, должно автоматически отключаться при возобновлении сердечной деятельности. При разработке устройства решались следующие задачи: определение эффективности

применения электропривода для реализации непрямого массажа сердца; определение возможности применения воздушных микронасосов для обеспечения искусственной вентиляции легких; исследование замкнутых контуров управления с датчиками усилия, давления и расхода для обеспечения заданных диапазонов параметров усилия нажатия на грудную клетку, расхода и давления воздуха, подаваемого в легкие.

Основными производителями устройств сердечно-легочной реанимации являются компании LUCAS [3], ZOLL [4], MED SING LONG, MARCH. Система компрессии грудной клетки LUCAS2 выполнено в виде скобы, надеваемой на грудную клетку человека, усилие создается в центре нажимным элементом. Автоматическое устройство для сердечно-легочной реанимации ZOLL AUTOPULSE выполнено в виде подушки, на которую укладывают человека, усилие создается через гибкий ремень, втягиваемый элементами привода, расположенного в корпусе. Машины для сердечно-легочной реанимации Auto-CPR выполнены в виде прикроватного поворотного устройства, создающего усилие в центральной части. Многофункциональная портативная CPR машина фирмы MED SING LONG также выполнена в виде поворотного устройства, однако содержит в своем составе аппарат искусственной вентиляции легких. В России выпускается прибор реанимации Health Affair CPR EZY KIT, позволяющий контролировать усилие и цикл ручного воздействия на грудную клетку. Наиболее близкой является система ZOLL, однако она не имеет аппарата искусственной вентиляции легких, и не обеспечивает всего реанимационного комплекса.

В процессе проведения экспериментов установлено, что для обеспечения необходимой деформации грудной клетки взрослого мужчины требуется усилия до $F = 600 \text{ Н}$, а суммарное перемещение ремней прижима составляет $h = 0,1 \text{ м}$. Конструктивно выбран радиус барабана $r = 0,03 \text{ м}$, тогда необходимый момент на валу электропривода составит $M = F \cdot r = 600 \cdot 0,03 = 18 \text{ Нм}$.

При совершении 120 двойных ходов в минуту линейная скорость составит $V = 0,4 \text{ м/с}$, а угловая скорость $\omega = \frac{V}{r} = \frac{0,4}{0,03} = 13 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Необходимая мощность электропривода $N = M\omega = 18 \cdot 13 = 234 \text{ Вт}$.

Схема переносного автоматизированного устройства для сердечно-легочной реанимации приведена на **Рис.1**.

В состав аппарата искусственной вентиляции легких (AIVL) входят два воздушных насоса: Н1 – обеспечивающий «вдох», и Н2 – реализующий «выдох». Подача воздуха в легкие биообъекта осуществляется через фильтр F1, для регулирования расхода воздуха установлен дроссель Dr1. Давление в нагнетательной полости контролируется датчиком давления DD1. Для исключения перетекания воздуха в атмосферу при вдохе установлен распределитель P1. Необходимые расход и давление воздуха при выдохе устанавливаются дросселями Dr2 и Dr3.

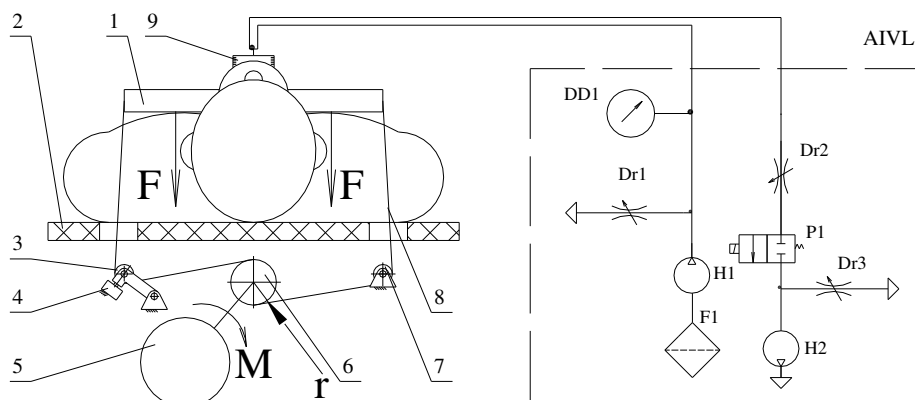


Рис.1 – Схема переносного автоматизированного устройства для сердечно-легочной реанимации, где 1 – прижим, 2 – носилки, 3 – подвижный ролик, 4 – датчик усилия, 5 – электропривод, 6 – приводной барабан, 7 – неподвижный ролик, 8 – ремень, 9 – дыхательный клапан.

Структурная схема переносного автоматизированного устройства для сердечно-легочной реанимации приведена на **Рис.2**. В ее состав входит электропривод с исполнительным механизмом в виде прижима с ремнями, воздействующим на биообъект. Управление электроприводом осуществляется от силового преобразователя, а цикл задается программируемым логическим контроллером (ПЛК) с панелью оператора. В исполнительном механизме установлен датчик давления, если усилие на грудную клетку превышает максимально допустимое значение, то привод переводится в режим уменьшения усилия. К биообъекту подключен датчик пульса, подающий сигнал о наличии пульса в ПЛК. АИВЛ подключается к биообъекту через дыхательный клапан, установленный в маске. Если клапан закрыт, то биообъект подключается к АИВЛ, если клапан открыт – то соединяется с атмосферой. Электропитание аппарата осуществляется от переносного блока аккумуляторов с возможностью переключения на переменного напряжения 220 В, 50 Гц.

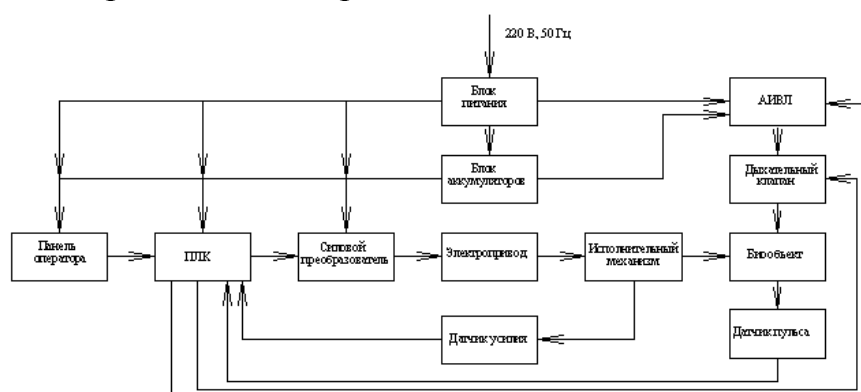


Рис.2 – Структурная схема переносного автоматизированного устройства для сердечно-легочной реанимации

Алгоритм работы устройства показан на **Рис.3** и заключается в следующем: биообъект подключается к устройству и проверяют наличие пульса, при его отсутствии закрывают дыхательный клапан и выполняют реанимационный цикл. При появлении пульса дыхательный клапан открывается, устройство отключают, биообъект отсоединяют.

Для реализации электропривода могут использоваться три типа двигателей: коллекторные ДПТ (двигатели постоянного тока), асинхронные двигатели переменного тока и бесколлекторные ДПТ и шаговые двигатели. Коллекторные ДПТ имеют большую удельную мощность [5], обеспечивают широкий диапазон регулирования скорости, однако их якорь отличается значительным моментом инерции и при частых реверсах образуется чрезмерное искрение на коллекторе. Асинхронные двигатели имеют меньшую удельную мощность [5], а значит, большие габариты, однако их ротор имеет небольшой момент инерции и отсутствует искрение. Бесколлекторные ДПТ имеют широкий круг функциональных возможностей, однако отличаются высокой стоимостью. Шаговые двигатели [7], обеспечивают необходимые крутящий момент и частоту реверсов и могут быть успешно применены в разрабатываемом устройстве.



Рис.3 – Алгоритм работы переносного автоматизированного устройства для сердечно-легочной реанимации

Автором разработан и испытан механизм циклического нагружения для сердечно-легочной реанимации, внешний вид которого показан на **Рис.4**. В

качестве имитатора грудной клетки человека использован пористый материал (черного цвета), упругость которого аналогична грудной клетке человека. При проведении экспериментов время сжатия и время отпуска регулировались в пределах от 0,25 до 0,5 с. В результате экспериментов достигнута максимальная необходимая частота воздействий 120 двойных ходов в минуту, при этом деформация «грудной клетки» составила 20 мм.

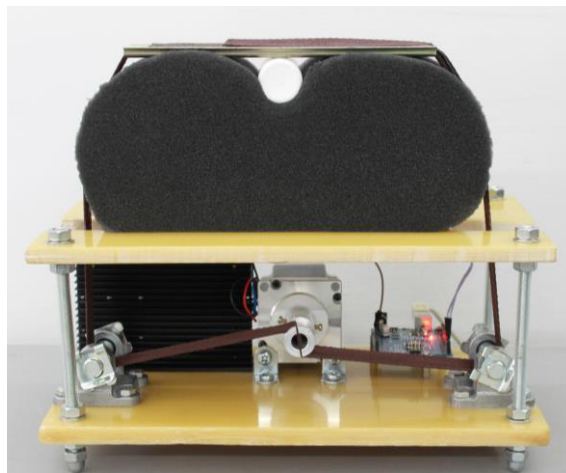


Рис.4 – Внешний вид масштабной модели механизма циклического нагружения

В дальнейшем предполагается создать и исследовать натурную модель переносного устройства для сердечно-легочной реанимации.

Библиографический список

1. Сердечно-легочная реанимация. Рекомендации Европейского совета по реанимации и Американской ассоциации сердца.- <https://medprosvita.com.ua/serdechno-legochnaya-reanimaciya-rekome/>.
2. Кузнецова О.Ю., Лебединский К.М., Дубикайтис Т.А. Сердечно-легочная и расширенная реанимация. – СПб: Издательство СПбМАПО, 2005. –176 с.
3. Устройство для сердечно-легочной реанимации LUCAS/ http://adhara.ru/articles/autopulse_and_cpr.htm.
4. Автоматическое устройство для сердечно-легочной реанимации ZOLL/<https://www.zoll.com/ru/medical-products/resuscitation-system/autopulse/ems> ; http://adhara.ru/articles/autopulse_and_c.pr.htm.
5. Пашков Е.В. Автоматизация в промышленности: Практикум. В 4 ч. Ч. III. Автоматизированный электропривод и моделирование механотронных модулей движения/ Е.В. Пашков, А.Н. Круговой, В.А. Крамарь, Л.Л. Беляева, В.В. Альчаков; под ред. Е.В. Пашкова. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 225 с., ил.
6. Справочник по электрическим машинам: в 2 т./ Под. общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Шаговые двигатели. <https://electroprivod.ru/fl110sth.htm>

Bibliograficheskiy spisok

1. Serdechno-legochnaya reanimaciya. Rekomendacii Evropejskogo soveta po reanimacii Amerikanskoj associacii serdca.- <https://medprosvita.com.ua/serdechno-legochnaya-reanimaciya-rekome/>.
2. Kuznecova O.YU., Lebedinskij K.M., Dubikajtis T.A. Serdechno-legochnaya i rasshirennaya reanimaciya. – SPb: Izdatel'stvo SPbMAPO, 2005. – 176 s.
3. Ustrojstvo dlya serdechno-legochnoj reanimacii LUCAS/ http://adhara.ru/articles/autopulse_and_cpr.htm.
4. Avtomaticheskoe ustrojstvo dlya serdechno-legochnoj reanimacii ZOLL / <https://www.zoll.com/ru/medical-products/resuscitation-system/autopulse/ems> ; http://adhara.ru/articles/autopulse_and_c.pr.htm.
5. Pahkov E.V. Avtomatizacija v promishlennosti: Praktikum. V 4 h. h. III. Avtomatizirovannij elektroprivod i modelirovanie mehanotronnih modulei dvigania/ E.V. Pahkov, A.N. Krugovoi, V.A. Kramar, L.L. Belaeva, V.V. Alhakov; pod. red. E.V. Pahkova. – Sevastopol: CevNTU, 2011. – 225 s., il.
6. Spravochnik po elektricheskim mashinam: v 2 t. Pod. Obtz. Red. I.P. Kopilova, B. K. Klokova. – M.: Energoatomizdat, 1988.
7. Shagovie dvigateli. <https://electroprivod.ru/fl110sth.htm>

¹Круговой Александр Николаевич, канд. техн. наук, доц.,
atpp_krugovoi@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

PORTABLE AUTOMATED DEVICE FOR CARDIOPULMONARY RESUSCITATION WITH ELECTRIC DRIVE

A.N. Krugovoy

When carrying out measures for cardiopulmonary resuscitation, efforts of a given frequency are applied to the human chest, to create which pneumatic or electric drives are used. In extreme conditions, a portable device with an autonomous power supply is required. The use of a compressed air cylinder significantly increases the total weight of the device, so it is advisable to use an electric drive, and use a battery as a power source. to provide the specified cyclic effects, the electric motor must operate in a constant reverse mode, which is not typical for most engines. The possibility of using various types of electric motors is analyzed, a large-scale installation for creating resuscitation efforts based on a stepper drive is created and tested.

Keywords: electric motor, reverse, cyclic forces, cardiopulmonary resuscitation, air micro-pumps.

*Krugovoy Aleksandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent,
atpp_krugovoi@mail.ru, Russia, Sevastopol,, Sevastopol State University*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ И БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ НЕПРЯМОГО АППАРАТНОГО МАССАЖА СЕРДЦА

Осипов К.Н.¹, Поливцев В.П.²

***Аннотация.** Рассматриваются вопросы оценки наиболее эффективных и безопасных с точки зрения принятых критериев режимов работы автоматического аппарата механического непрямого массажа сердца, проводимого в ходе сердечно-легочной реанимации, в том числе в полевых условиях, с использованием перспективной инновационной конструкции аппарата, разработанной в НИЛ ЭСЖБО ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».*

***Ключевые слова:** сердечно-легочная реанимация, аппарат автоматического непрямого массажа сердца, механическая компрессия грудной клетки, остановка кровообращения.*

Реализация программ государственной важности в области создания импортозамещающих медицинских и биотехнических технологий неразрывно связана с созданием отечественных интеллектуальных автоматических систем сердечной реанимации биологических объектов, в том числе и человека, особенно в условиях современной геополитической обстановки, характеризующейся нарастающей напряженностью международных отношений. Появляется силовое разрешение конфликтных ситуаций в регионах, имеющих общую границу с Российской Федерацией, что ставит новые технические задачи перед отечественным медицинским приборостроением.

Кроме этого актуальность исследований подтверждается не только стратегией развития Российской Федерации на 2020 – 2030 годы, отраженной в Указе Президента РФ от 2018 года №198 «Основы государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», но и исследованиями, полученными Американской кардиологической ассоциацией (American Heart Association – АНА), а также Европейским объединением по сердечно-легочной реанимации, что отражено в международных базах данных PubMed и Cochrane Collaboration [1-4].

Обзор современной научной и технической литературы последних лет показал, что к настоящему времени в медицинской практике используется два принципиально разных типа изделий сердечной реанимации, реализующих непрерывные механические компрессии грудной клетки для поддержания кровообращения у пациентов с внезапной остановкой сердца.

Первый тип выпускается фирмой *Stryker Medical* и имеет общепринятое международное название ЛУКАС (ЛУКАС-2). Аппарат является аппаратом поршневого действия, реализующий не более 100 сокращений в минуту при

глубине вдавливания (величине деформации грудной клетки) 4,5 – 5 см. Внешний вид аппарата представлен на **Рис.1**.



Рис.1 – Внешний вид аппарата ЛУКАС

К сожалению, несмотря на большое количество преимуществ изделия данного класса, описанные, например, в [1], имеют некоторые недостатки. К основным можно отнести: отсутствие возможности выполнять, даже, частичную искусственную вентиляцию легких, а также невозможность использования аппаратов при транспортировке человека под углом к горизонту, т.к. грудная клетка, ширина которой не должна превышать 45 см. при максимальной высоте в 30 см. в ходе реализации механической компрессии, должна обязательно находиться в горизонтальном положении. Кроме этого, в литературе отсутствует информация о возможности использования аппарата совместно с аппаратом ИВЛ (искусственной вентиляции легких), а также о возможности сопряжения аппарата с другими системами жизнеобеспечения, что снижает, а в некоторых случаях, ставит под сомнение возможность интеллектуализации процесса реанимации, особенно при работе изделий в стационарных лабораторных или клинических условиях.

Альтернативные аппараты – аппараты типа «Zoll» (**Рис.2**), сочетающие в себе стерильную и торакальную компрессию грудной клетки при проведении непрямого массажа сердца путем реализации объемного давления на грудную клетку.



Рис.2 – Пример аппарата типа Zoll

Аппараты конфигурации типа «Zoll» характеризуются высокой стоимостью, а также необходимостью использования одноразовых расходных материалов, например, бандажей.

Помимо указанных частных недостатков, предлагаемые на современном рынке аппараты сердечной реанимации, к сожалению, не оснащаются линиями обратной связи по величине сжатия, а также по величине усилия и не обладают линиями связи с внешними периферийными устройствами, позволяющими в сжатые сроки встраивать аппараты в общую интегральную систему жизнеобеспечения. В результате этого, решение задачи создания отечественных интеллектуальных автоматических систем сердечной реанимации человека по-прежнему остается актуальным и своевременным.

Целью данной работы является экспериментальная оценка эффективных и безопасных режимов непрямого аппаратного механического массажа сердца для обеспечения заданных параметров кровообращения.

Сущность закрытого механического массажа сердца заключается в сдавливании сердца между грудиной и позвоночником, опорожнении камер сердца в магистральные (аорта и легочная артерия) сосуды и последующим заполнением камер сердца из венозного русла большого и малого круга кровообращения. При этом кровообращение обеспечивается не только сжатием сердца, но и, прежде всего, увеличением внутригрудного давления, которое способствует выбросу крови из легких через левые отделы сердца в большой круг кровообращения. Короткие, резкие сжатия грудной клетки обуславливают достаточно высокие подъемы АД (артериального давления), не сопровождающиеся, однако, адекватным искусственным кровотоком в сосудистом русле. Поэтому массаж должен быть плавным и ритмичным с одинаковой продолжительностью сдавливания и расслабления, т.е. соотношение искусственной систолы к диастоле должно составлять 1 : 1 [1 - 9].

Для решения указанной задачи в научно-исследовательской лаборатории экспериментальных систем жизнеобеспечения биологических объектов ФГАОУ ВО «СевГУ» разработан аппарат, в котором обеспечение заданных параметров

компрессии грудной клетки достигается путем механического взаимодействия демпфирующего элемента 1 (**Рис.3**) с грудной костью (грудиной).

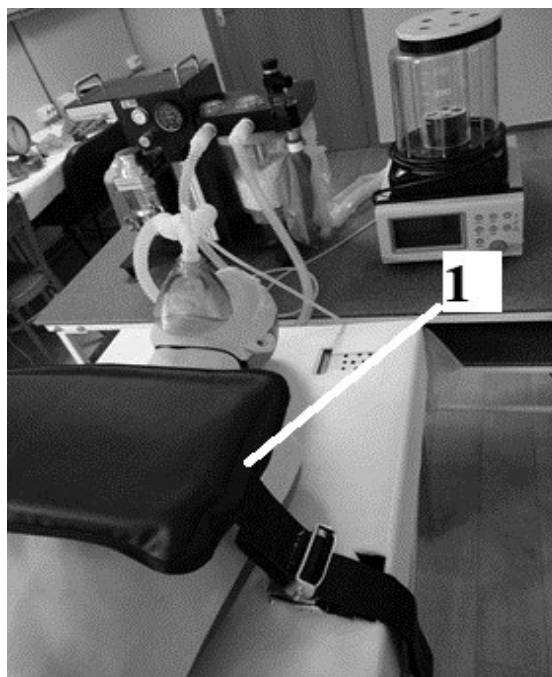


Рис.3 – Внешний вид аппарата сердечной реанимации

Требуемое усилие, обеспечивающее деформацию грудной клетки на величину, задаваемую оператором, создается модулем пневматического линейного перемещения, который при необходимости может быть заменен на пневматический неполноповоротный привод. С целью защиты костных тканей от повреждения универсальный модуль оборудован датчиком усилия и датчиком перемещения. Совместная работа указанных датчиков реализует обратную связь как по усилию, так и по величине деформаций грудной клетки. При этом механическая (кинематическая) взаимосвязь между нажимной пластиной 1 (**Рис.1**) и модулем тягового усилия реализуется с помощью приводных регулируемых оператором аппарата ремней.

Из фундаментальных работ отечественных и зарубежных исследователей, например, N.S. Chandra, Царева А.В. [1, 5], известно, что основной проблемой искусственного (ручного, не механизированного) поддержания кровообращения является очень низкий уровень (менее 30 % от нормы) сердечного выброса, создаваемого при компрессии грудной клетки. Даже правильно проводимая не механизированная за счет мышечной силы человека механическая компрессия грудной клетки обеспечивает поддержание систолического АД на уровне 60–80 мм. рт.ст., в то время как АД диастолическое редко превышает 40 мм рт.ст. и, как следствие, обуславливает низкий уровень мозгового (30–60 % от нормы) и коронарного (5–20 % от нормы) кровотока.

Учитывая вышеизложенное, в современных рекомендациях по проведению СЛР Европейского совета по реанимации 2010 г. основной акцент поставлен на выполнение условия максимальной минимизации времени на паузы при проведении компрессии грудной клетки, поскольку непрерывность компрессии грудной клетки является основным залогом успеха СЛР. Крайне

важным, является обеспечение достаточной глубины компрессии грудной клетки, поскольку необходимо отметить, что зачастую реаниматоры не надавливают на грудную клетку достаточно глубоко, что снижает эффективность индуцированного компрессией кровообращения, а соответственно ухудшает исход СЛР [1,10]. Последнее объясняет важность задач оптимизации режимов автоматической компрессии грудной клетки в процессе СЛР.

Принимая во внимание сказанное, с целью оценки эффективности и безопасности режимов работы аппарата непрямого массажа сердца с точки зрения принятых критериев в рамках опытно-конструкторских изысканий был реализован ряд лабораторных многофакторных экспериментов, в ходе которых опытным и теоретическим путем определялись показатели, характеризующие регулировочные и нагрузочные характеристики изделия. Так, например, с целью выявления наилучших с точки зрения расхода рабочего тела режимов работы аппарата, обеспечивающих необходимую компрессию грудной клетки исследована зависимость перемещения центра масс нажимной пластины 1 (**Рис.3**) от величины рабочего давления рабочего тела в основной воздухоподводящей магистрали (таблица 1), в результате чего был определен диапазон допустимых давлений, обеспечивающих опорожнение камер сердца в магистральные (аорта и легочная артерия) сосуды с последующим заполнением камер сердца из венозного русла большого и малого круга кровообращения.

Для оценки объема требуемых ресиверов, обеспечивающих автономный режим работы аппарата, а также для определения характеристик воздуходувных установок (например, компрессоров поршневого типа), в ходе натурного эксперимента были получены и исследованы характеристики объемного расхода рабочего тела в зависимости от рабочего давления и частоты сжатия грудной клетки, что, в свою очередь, позволило разработать расходных характеристик изделия и установить, что для автономной работы аппарата в стационарном и полевом режиме необходимо и достаточно наличие ресиверов объемом от 180 до 250 литров или компрессора производительностью не менее 170 лит/мин. При этом, полученные характеристики позволили установить, что показателями эффективности непрямого массажа сердца могут служить: частота сжатия (не менее 100 раз в минуту), глубина деформирования грудной клетки (не менее 5 см. у взрослых), отношение времени компрессии (искусственная систола) ко времени релаксации (искусственная диастола) — от 30 до 50 %, давление рабочего тела в приводах (не менее 3,5 бар), объем накопительных ресиверов (не менее 170 литров). Кроме этого, анализ режимов работы аппарата автоматического непрямого массажа сердца позволил установить, что использование оптимальных режимов работы изделия позволяет повысить эффективность реанимационных мероприятий, особенно в случае необходимости их пролонгации более 30 минут, обеспечить надежность и безопасность операций СРЛ для пациентов.

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Давление, бар.	Теоретическое значение	Реальное значение	Макс. перемещение, см	Макс. усилие сжатия, Н	Ошибка, %
Частота сокращений 100 раз/мин					
2	0.66	0.75	3,4	145	12.00%
2.5	0.825	1.11	3,5	193	25.68%
3	0.99	1.12	4,0	234	11.61%
3.5	1.155	1.22	4,50	277	5.33%
4	1.32	1.25	4,80	336	5.30%
4.5	1.485	1.45	5,2	382	2.36%
5	1.65	1.53	7,01	435	7.27%
5.5	1.815	1.85	7,25	480	1.89%

Принимая во внимание большой потенциал использования аппаратов автоматического непрямого массажа сердца при проведении СЛР в условиях неблагоприятного или ограниченного пространства, при переносе или транспортировке пациентов прежде всего на догоспитальном этапе, а также во внутрибольничных условиях, последующие исследования могут быть связаны с клиническими испытаниями, а также с совершенствованием масса-габаритных характеристик.

Библиографический список

1. Кобеяцкий Ю.Ю. Механическая компрессия грудной клетки при проведении сердечно-легочной реанимации: опыт использования аппарата autopulse / Ю.Ю. Кобеяцкий, А.В. Царев // Медицина неотложных состояний – № 4(51) – 2013 С.62-67.
2. Обзор обновленных рекомендаций Американской ассоциации сердца по сердечно-легочной реанимации и неотложной помощи при сердечно-сосудистых заболеваниях от 2015 г.
3. Olesen R.M. Statistical analysis of the DIAMOND MI study by the multipole method./ R.M. Olesen, P.E. Thomsen, K. Saermark, M. Glikson et al. // J Physiol Meas 2005; 26(5):591-8.
4. Roger VL, Go A. On behalf of the American Heart Association Statistics Committee and Stroke Statistics Subcommittee. / V.L. Go A Roger, D.M. Lloyd-Jones, et al. //Heart Disease and Stroke Statistics—2012 Update: A Report From the American Heart Association Circulation 2012; 125:e2-e220.
5. SPRINT Research Group. A randomized trial of intensive versus standard blood-pressure control // N. Engl. J. Med. 2015. V. 373. P. 2103-2116.
6. Perkovic V., Rodgers A. Redefining blood-pressure targets - SPRINT starts the marathon // N. Engl. J. Med. 2015. V. 373. P. 2175-2178.

7. Esler M. SPRINT, or false start, towards a lower universal treated blood pressure target in Hypertension // Hypertension. 2015. pii: HypertensionAHA.115.06735. [Epub ahead of print].
8. Bress A.P., Tanner R.M., Hess R. et al. Generalizability of results from the Systolic Blood Pressure Intervention Trial (SPRINT) to the US adult population // J. Am. Coll. Cardiol. 2015. pii: S0735-1097(15)07103-X. [Epub ahead of print]. DOI: 10.1016/j.jacc.2015.10.037
9. Deakin C.D., Nolan J.P., Soar J., Sunde K., Koster R.W., Smith G.B., Perkins G.D. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2010. Section 4. Adult advanced life support // Resuscitation. — 2010. — Vol. 81. — P. 1305-1352.
10. Eisenberg M.J., Windle S.B., Roy N. et al. Varenicline for smoking cessation in hospitalized patients with acute coronary syndrome // Circulation. 2015. pii: CirculationAHA.115.019634. [Epub ahead of print].
11. Black J.T., Romano P.S., Sadeghi B. et al.; BEAT-HF Research Group. A remote monitoring and telephone nurse coaching intervention to reduce readmissions among patients with heart failure: study protocol for the Better Effectiveness After Transition - Heart Failure (BEAT-HF) randomized controlled trial // Trials. 2014. V. 15. P. 124.
12. Pathak R.K., Middeldorp M.E., Stolcman S. et al. Aggressive Risk factor Reduction Study: Implications for the substrate for atrial fibrillation (ARREST-AF Substrate Study) // American Heart Association (AHA) 2015 Scientific Sessions; November 7, 2015.
13. Orlando, FL. Abstract 102. Pathak R.K., Middeldorp M.E., Lau D.H. et al. Aggressive risk factor reduction study for atrial fibrillation and implications for the outcome of ablation: the ARREST-AF cohort study // J. Am. Coll. Cardiol. 2014. V. 64. P. 2222-2231.

Bibliograficheskij spisok.

1. Kobelyackij YU.YU. Mekhanicheskaya kompressiya grudnoj kletki pri provedenii serdechno-legochnoj reanimacii: opyt ispol'zovaniya apparata autopulse / YU.YU. Kobelyackij, A.V. Carev // Medicina neotlozhnyh sostoyanij – № 4(51) – 2013 S.62-67.
2. Obzor obnovlennyh rekomendacij Amerikanskoj asociacii serdca po serdechno-legochnoj reanimacii i neotlozhnoj pomoshchi pri serdechno-sosudistyh zabolevaniyah ot 2015 g.
3. Olesen R.M. Statistical analysis of the DIAMOND MI study by the multipole method./ R.M. Olesen, P.E. Thomsen, K. Saermark, M. Glikson et al. // J Physiol Meas 2005; 26(5):591-8.
4. Roger VL, Go A. On behalf of the American Heart Association Statistics Committee and Stroke Statistics Subcommittee. / V.L. Go A Roger, D.M. Lloyd-Jones, et al. //Heart Disease and Stroke Statistics—2012 Update: A Report From the American Heart Association Circulation 2012; 125:e2-e220.
5. SPRINT Research Group. A randomized trial of intensive versus standard blood-pressure control // N. Engl. J. Med. 2015. V. 373. P. 2103-2116.

6. Perkovic V., Rodgers A. Redefining blood-pressure targets - SPRINT starts the marathon // N. Engl. J. Med. 2015. V. 373. P. 2175-2178.
7. Esler M. SPRINT, or false start, towards a lower universal treated blood pressure target in Hypertension // Hypertension. 2015. pii: HypertensionAHA.115.06735. [Epub ahead of print].
8. Bress A.P., Tanner R.M., Hess R. et al. Generalizability of results from the Systolic Blood Pressure Intervention Trial (SPRINT) to the US adult population // J. Am. Coll. Cardiol. 2015. pii: S0735-1097(15)07103-X. [Epub ahead of print]. DOI: 10.1016/j.jacc.2015.10.037
9. Deakin C.D., Nolan J.P., Soar J., Sunde K., Koster R.W., Smith G.B., Perkins G.D. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2010. Section 4. Adult advanced life support // Resuscitation. — 2010. — Vol. 81. — P. 1305-1352.
10. Eisenberg M.J., Windle S.B., Roy N. et al. Varenicline for smoking cessation in hospitalized patients with acute coronary syndrome // Circulation. 2015. pii: CirculationAHA.115.019634. [Epub ahead of print].
11. Black J.T., Romano P.S., Sadeghi B. et al.; BEAT-HF Research Group. A remote monitoring and telephone nurse coaching intervention to reduce readmissions among patients with heart failure: study protocol for the Better Effectiveness After Transition - Heart Failure (BEAT-HF) randomized controlled trial // Trials. 2014. V. 15. P. 124.
12. Pathak R.K., Middeldorp M.E., Stolcman S. et al. Aggressive Risk factor Reduction Study: Implications for the substrate for atrial fibrillation (ARREST-AF Substrate Study) // American Heart Association (AHA) 2015 Scientific Sessions; November 7, 2015.
13. Orlando, FL. Abstract 102. Pathak R.K., Middeldorp M.E., Lau D.H. et al. Aggressive risk factor reduction study for atrial fibrillation and implications for the outcome of ablation: the ARREST-AF cohort study // J. Am. Coll. Cardiol. 2014. V. 64. P. 2222-2231.

*Осипов Константин Николаевич, канд. техн. наук, доц.,
assistenttmm@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный
университет,*

*Поливцев Виктор Петрович, канд. техн. наук, доц.,
polivcev.viktor@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

EXPERIMENTAL EVALUATION OF EFFECTIVE AND SAFE MODES OF INDIRECT HARDWARE HEART MASSAGE

K.N. Osipov, V.P. Polivtsev

The article considers the issues of evaluating the most effective and safe modes of operation of the automatic device for mechanical indirect heart massage performed during cardiopulmonary resuscitation, including in the field, using a promising

innovative design of the device developed in the NIL ESZHBO OF the Sevastopol state University.

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

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

Polivtsev Victor, candidate of technical sciences, docent, polivcev.viktor@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №4(12) 2020 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление
- 05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы
- 05.02.00 Машиностроение и машиноведение

Адрес редакции:

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

Телефон редакции: 8(692)550077

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

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

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

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

Учредитель и издатель

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

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

Главный редактор: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 23.12.2020. Заказ 011К. Дата выхода в свет: 28.12.2020. Тираж: 50 экз.
Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 13,6.

Севастополь, 2020