

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№1(5)
2019

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

Выходит 4 раза в год

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И
ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-
ПРИБОРОСТРОЕНИИ**
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Брянск 2019 г.

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

Осипов К.Н., 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)

Кристалль 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)

Доронина Ю.В., д.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Качур С.М., 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)

Заморёнов М.В., к.т.н.

(г. Севастополь)

Майстришин М.М., к.т.н.

(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

- Бохонский А.И., Майстришин М.М.* Стабилизация частоты колебаний телескопической руки манипулятора при совмещении движений. 3
- Вожжов А.А.* Исследование динамики гидроимпульсного привода (ГИП) устройств ударного действия. 14
- Осипов К.Н., Шмидт Л.А., Коломийченко В.П.* Автоматизированное нагружающее устройство стенда для производственных испытаний двигателей внутреннего сгорания 19
- Васютенко А.П., Ефремова Л.В., Тараховский А.Ю.* В исследование усилия воздействия струи воздуха пневматического измерительного преобразователя на тензобалку 26

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Песчанский А.И.* Стационарные характеристики двухкомпонентной ненадежной восстанавливаемой системы с мгновенно пополняемым временным резервом 35
- Копп В.Я., Заморёнов М.В., Шевченко В.И.* Моделирование системы облачного хранения данных с кэш-памятью 46
- Рапацкий Ю.Л., Заморенов М.В., Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Липка В.М.* Исследование влияния необесценивающих отказов на производительность и надежность автоматизированного механосборочного производства на основе полумарковской модели 68
- Бохонский А.И., Варминская Н.И.* Оценка эффективности управлений перемещением объектов 84
- Альчаков В.В., Крамарь В.А.* Построение математической модели захвата антропоморфного робота на основе метода Денавита – Хартенберга 92
- Филипович О.В.* Имитационная модель двухпараметрической селективной сборки двух элементов 103

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Скатков И.А., Заморенова Д.В.* Обработка показаний индуктивного датчика перемещения на основе измерения временных параметров его выходного сигнала 113

Учредитель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Российская Федерация, Севастополь, ул. Университетская 33. № рег. СМИ: ПИНФС77-73958 от 12.окт.2018 г.

Издатель: 1. ФГАОУ ВО Российская Федерация, «Брянский государственный технический университет», 241035, г. Брянск, бул.50 лет Октября, 7;

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

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© Авторы статей

УДК 65.011.56:621.65.8

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ РУКИ
МАНИПУЛЯТОРА ПРИ СОВМЕЩЕНИИ ДВИЖЕНИЙ**

Бохонский А.И.¹, Майстришин М.М.²

***Аннотация.** Предложена и исследована стабилизация жесткости телескопической руки манипулятора при изменении ее длины, которая основана на вращении элементов руки вокруг продольной оси. Это позволило использовать специальные законы оптимального управления, которые применяются для руки с постоянными частотами собственных колебаний (постоянной конечной жесткости).*

***Ключевые слова.** Упругая телескопическая рука, изменение ее длины, стабилизация жесткости, оптимальное управление движением.*

Введение. Исследованиям оптимального управления движением объектов посвящены работы [1-5], в которых также уделяется внимание пассивному и активному гашению колебаний.

Предложенные и исследованные в [6-14] законы оптимального переносного движения объектов малой жесткости предполагают, что частота первого тона собственных колебаний постоянна, а для системы с конечным числом степеней свободы выполняется дополнительное условие – частоты относятся между собой как целые числа. Если же, например, происходит совмещение движений – выдвижение руки либо изменение ее конфигурации (для антропоморфных рук), то жесткость меняется, и, следовательно, изменяются собственные частоты, что не позволяет использовать законы оптимального переносного движения для руки постоянной жесткости.

Цель исследований – применение непрерывной стабилизация жесткости телескопической руки манипулятора для реализации оптимального переносного движения, которое обычно используется для руки с постоянной жесткостью.

В случае выдвижения телескопической руки ее изгибная жесткость уменьшается. Если при этом возможно непрерывно изменять соответствующим образом осевой момент инерции поперечного сечения, то не исключается достижение непрерывной стабилизации (постоянства) изгибной жесткости руки.

Предлагается стабилизацию жесткости руки осуществлять в результате поворотов элементов ее конструкции относительно продольной оси на некоторый угол $\alpha(t)$, который определенным образом согласовывается с ее

выдвижением. Закон вращения элементов руки (**Рис.1**) согласуется с законом ее поступательного движения (вдоль оси x).

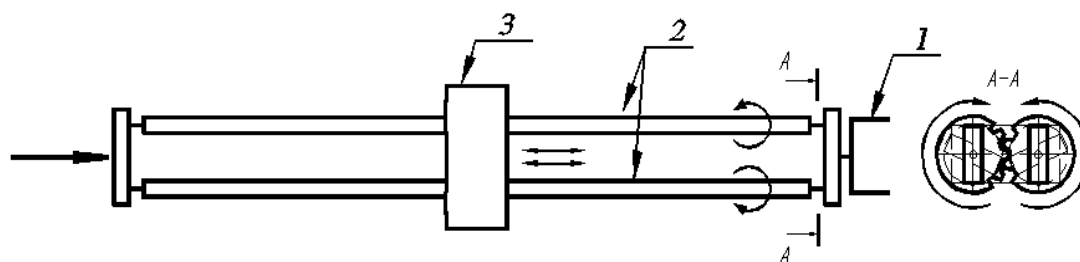


Рис.1 – Схема механизма стабилизации жесткости руки: 1 – схват; 2 – элементы руки; 3 – устройство для реализации вращательного движения

С учетом равенства нулю центробежного момента инерции ($J_{zy} = 0$) для момента инерции поперечного сечения при повороте одного элемента поперечного сечения из исходного положения (**Рис.2**) на угол α следует:

$$J_{z_1} = J_z \cos^2 \alpha + J_y \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

где J_z , J_y – осевые моменты инерции прямоугольного элемента в исходном положении.

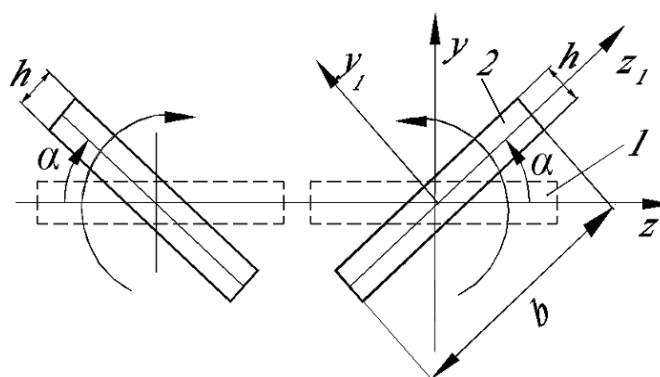


Рис.2 – Схема определения осевых моментов инерции поперечного сечения руки (при повороте элементов на угол α): 1 – исходное положение; 2 – произвольное повернутое положение элемента

Осейвой момент инерции поперечного сечения одной пластины относительно оси z при условии, что сечение повернуто на угол α согласно (1), вычисляется по формуле:

$$J_z = J_{z_1} \cos^2 \alpha + J_{y_1} \sin^2 \alpha = \frac{bh}{12} (h^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha), \quad (2)$$

где b , h – размеры поперечного сечения; α – угол поворота при вращении относительно продольной оси x . Формулу (2) преобразовано к виду:

$$J_z = J_{z_1} (1 - \sin^2 \alpha) + J_{y_1} \sin^2 \alpha = J_{z_1} + (J_{y_1} - J_{z_1}) \sin^2 \alpha. \quad (3)$$

Из (3) получено выражение для угла поворота:

$$\alpha = \arcsin\left(\sqrt{(J_z - J_{z_1})/(J_{y_1} - J_{z_1})}\right) \quad (4)$$

Если руку рассматривать как систему с одной степенью свободы (с сосредоточенной массой M на конце), то в начальный момент времени квадрат частоты собственных колебаний вычисляется так:

$$k^2 = 2(3EJ_{z_1}/L_0^3 M), \quad (5)$$

где L_0 – начальная длина руки; M – сосредоточенная масса (в центре масс схвата). В произвольный момент времени при выдвижении руки квадрат частоты (5) равен:

$$k^2 = 2\left(3EJ_z/[L_0 + L(t)]^3 M\right), \quad (6)$$

где $L(t)$ приращение длины руки. Из (5) и (6) следует зависимость

$$\frac{J_{z_1}}{L_0^3} = \frac{J_z}{[L_0 + L(t)]^3}, \quad (7)$$

и из (7) выражение для момента инерции повернутого сечения относительно неподвижной оси z принимает вид

$$J_z = J_{z_1}[L_0 + L(t)]^3 / L_0^3, \quad (8)$$

т.е. формула (8) отражает изменение момента инерции поперечного сечения в зависимости от выдвинутой части руки $L(t)$ при соблюдении условия частота $k = \text{const}$. Если выдвижение руки происходит равномерно, то $L(t) = Vt$, где V – скорость выдвижения. После подстановки (8) в (4), получена зависимость угла поворота от времени:

$$\alpha(t) = \arcsin\left(\sqrt{\left(J_{z_1}[L_0 + Vt]^3 / L_0^3 - J_{z_1}\right) / (J_{y_1} - J_{z_1})}\right). \quad (9)$$

Итак, если угол поворота элементов поперечного сечения изменять по закону (9), то частота собственных колебаний остается постоянной. Угол поворота должен изменяться в пределах $\frac{\pi}{2} \geq \alpha \geq 0$. Кроме того, следует учитывать моменты инерции двух других стержней. Из (9) находится $L(t) = Vt = \max$, при котором $\alpha_{\max} = \pi/2$.

На кинематику вращательного движения руки влияет ее начальная длина L_0 . Производные для $\alpha(t)$ обладают особенностями (при $t=0$ и $t=\max$). Однако, при равномерном выдвижении руки можно полагать, что вращение стержней тоже равномерное.

Пример 1. Исходные данные: $b = 0,05$ м.; $h = 0,02$ м.; $L_0 = 0,8$ м.; $V = 0,15$ м/с; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па. График $\alpha = \alpha(t)$ изображен на **Рис.3а**. При $t = t_1 = 4,49$ с. следует $\alpha(t_1) = \pi / 2$; за это время рука выдвигается на $\Delta L = 0,6735$ м.

Обратная задача, имеющая практическое значение, состоит в определении закона изменения (выдвижения руки, $L(t)$) при условии, что $\alpha(t) = \omega t$, где $\omega = \text{const}$ – угловая скорость вращения элемента вокруг продольной оси x . Из (9) следует:

$$L(t) = \frac{\sqrt{(J_{y_1} \sin^2 \alpha - J_{z_1} \sin^2 \alpha + J_{z_1}) J_{z_1}^2 L_0}}{J_{z_1}} - L_0,$$

где $\alpha = \omega t$.

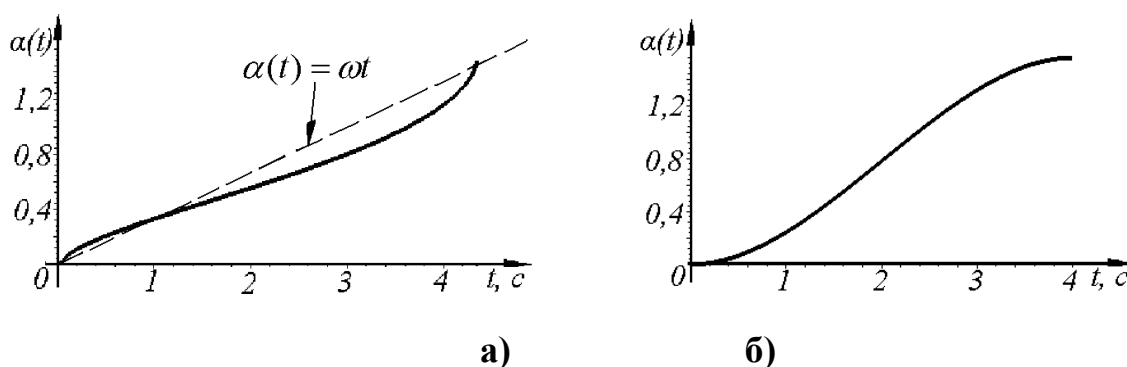


Рис.3 – Графики $\alpha = \alpha(t)$: а) $\alpha \approx \omega t$; б) $\alpha(t) = \alpha_{\max} \left(3 - \frac{2t}{t_1} \right) t^2 / t_1^2$

Пример 2. Принято $\omega = 0,39$ с⁻¹. Графики функций $L(t)$, $\dot{L}(t)$, $\ddot{L}(t)$ изображены на **Рис.4**.

Как следует из графиков, при неравномерном выдвижении руки ускорение за время движения меняет знак на противоположный. В момент времени $t_1 = 4$ с, $\alpha_{\max} = 1,56$ рад. Фактически поступательное движение (выдвижение руки вдоль оси x) оптимально, т.е. происходит оптимальный разгон с торможением.

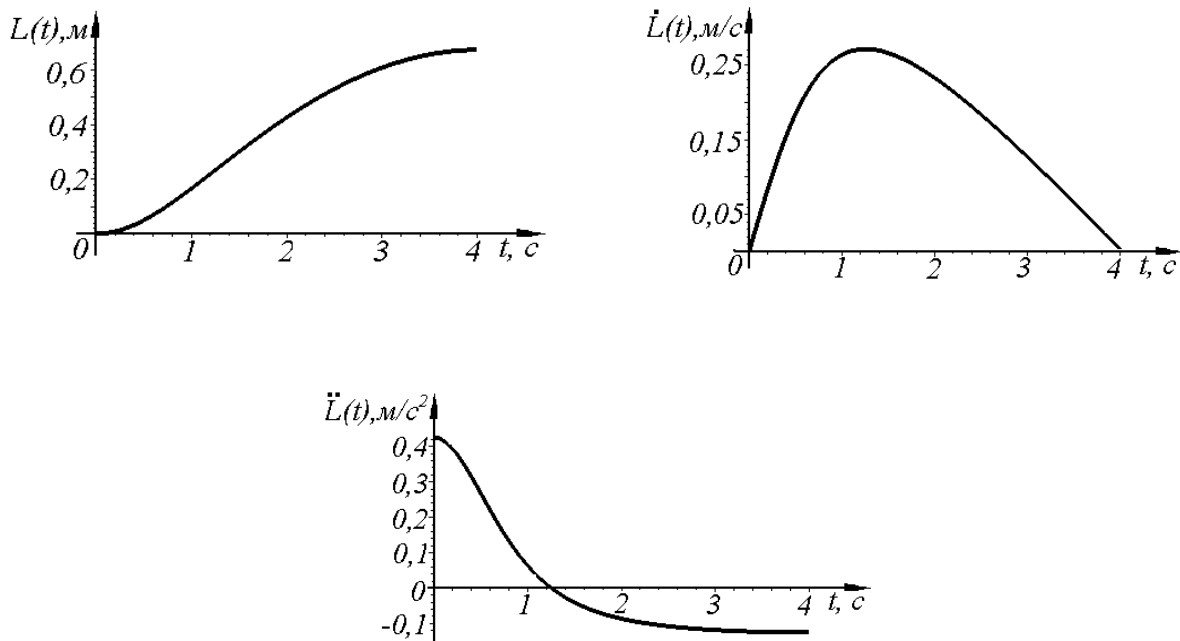


Рис.4 – Графики функций $L(t)$, $\dot{L}(t)$, $\ddot{L}(t)$ при $\alpha = \omega t$

Если принять характерное оптимальное управление [1] вращением элементов руки относительно продольной оси в виде (**Рис.3б**)

$$\alpha(t) = \alpha_{\max} \left(3 - \frac{2t}{t_1} \right) t^2 / t_1^2,$$

то, после подстановки его в (10), получим выражение для $L(t)$. Для этого случая графики функций $L(t)$, $\dot{L}(t)$, $\ddot{L}(t)$ (при $t_1 = 4\text{с}$, $\alpha_{\max} = 1,56\text{рад}$) изображены на **Рис.5**. Из графиков следует, что при задании оптимального управления вращением элементов руки ему соответствует оптимальное поступательное перемещение схвата вдоль оси x .

Схема конструктивного решения механизма стабилизации жесткости руки при ее выдвигении изображена на **Рис.1**.

Предложенный подход в стабилизации жесткости позволяет совмещать несколько оптимальных движений – поступательное всей руки (в направлении оси y), вращательное (относительно вертикальной оси) с выдвигением руки.

В [7-15] рассмотрены оптимальные законы переносного поступательного и вращательного движений упругих объектов с приложениями к телескопическим манипуляторам.

Рука, как нежесткий стержень, участвует в двух движениях: переносном (вращение вокруг вертикальной оси) и относительном (изгибные колебания по отношению к подвижной оси X). Схема поворота на угол φ_* изображена на **Рис.6**. С учетом краевых условий ($\omega_e(T) = 0$, $\varphi_e(T) = \varphi_*$, $\varphi_e(0) = 0$), выражения для углового ускорения, угловой скорости и угла поворота руки:

$$\ddot{\varphi}_e(t) = \varepsilon_e(t) = \frac{\varphi_* p^2}{2\pi} \sin pt, \quad \omega_e(t) = -\frac{\varphi_* p}{2\pi} \cos pt + \frac{\varphi_* p}{2\pi},$$

$$\phi_e(t) = -\frac{\phi_*}{2\pi} \sin pt + \frac{\phi_* pt}{2\pi},$$

где φ_e – угол поворота; $p = 2\pi/T$; T – общее время вращательного движения.

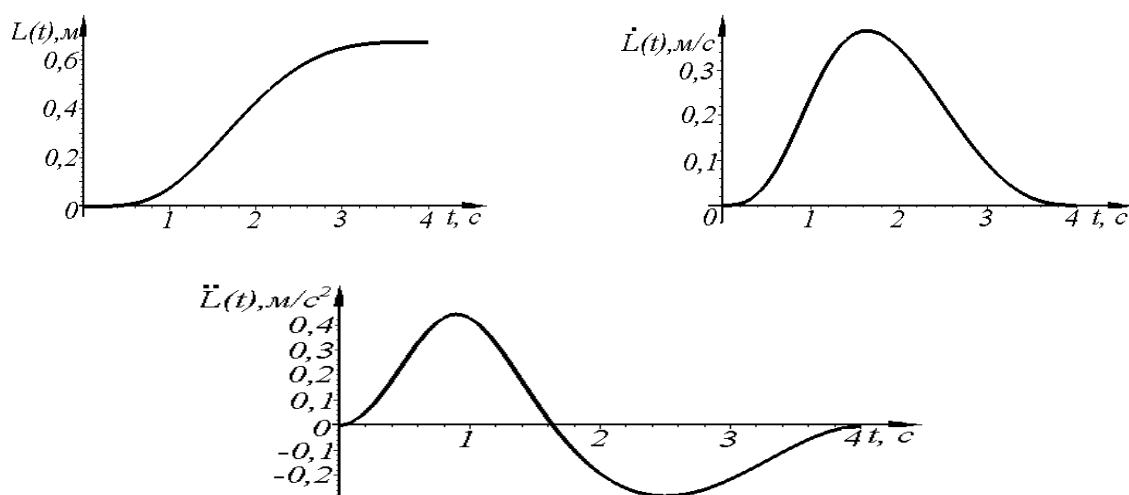


Рис.5 – Графики функций $L(t)$, $\dot{L}(t)$, $\ddot{L}(t)$ при $\alpha(t) = \alpha_{\max} \left(3 - \frac{2t}{t_1} \right) t^2 / t_1^2$

оптимальное вращение руки с распределенной массой

Необходимо отметить, что при $t = T = 2\pi/p$, $\omega_e(T) = 0$, $\varphi_e(T) = \varphi_*$, т.е. в этот момент времени наступает покой руки в переносном вращательном движении. Если период первого тона собственных изгибных колебаний руки в целое число раз меньше времени переносного вращательного движения T , то изгибные колебания отсутствуют в конце вращательного движения, т.е. имеет место абсолютный покой в конечной точке позиционирования нежесткой руки.

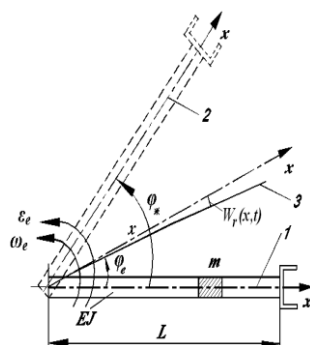


Рис.6 – Схема поворота руки: 1 – исходное положение; 2 – конечное положение; 3 – изогнутая ось

Графики угла поворота, угловой скорости и углового ускорения изображены на **Рис.7**.

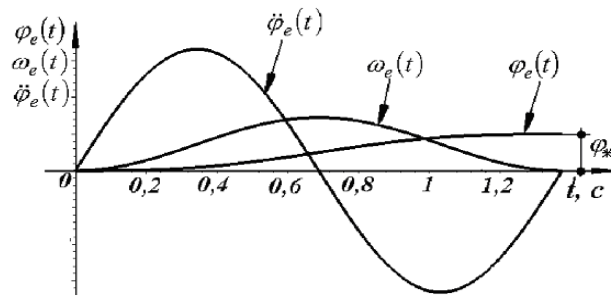


Рис.7 – Графики функций $\varphi_e(t)$, $\omega_e(t)$, $\ddot{\varphi}_e(t)$

Дифференциальное уравнение изгибных колебаний (относительное движение) без учета сопротивления:

$$EJ \frac{\partial^4 W_r(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 W_r(x, t)}{\partial t^2} = -f(x, t), \quad (10)$$

здесь EJ – изгибная жесткость (E – модуль упругости материала; J – осевой момент инерции поперечного сечения); $W_r(x, t)$ – функция прогиба (для сечения с координатой x); m – масса единицы длины; $f(x, t) = \varepsilon_e(t) x m$ – интенсивность распределенной инерционной нагрузки. В соответствии с методом Фурье решение (для первой моды изгибных колебаний) находится в виде:

$$W_1(x, t) = w_1(x) \sin pt. \quad (11)$$

После подстановки (10) в (11) и преобразований получено следующее неоднородное дифференциальное уравнение четвертого порядка

$$\frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} - k^4 w_1(x) = -\frac{\varphi_* p^2 m}{2\pi EJ} x, \quad (12)$$

где $k^4 = mp^2/EJ$; φ_* – максимальный угол поворота. Общее решение (12) находится с использованием функций А.Н. Крылова

$$w_1(x) = AS(x) + BT(x) + CU(x) + DV(x) + \frac{\varphi_* p^2 m}{2\pi k^4 EJ} x,$$

где $S(x)$, $T(x)$, $U(x)$, $V(x)$ – функции А.Н. Крылова. Постоянные интегрирования A, B, C, D определяем с учетом краевых условий:

$$w_1(0) = 0, \quad w_1'(0) = 0, \quad w_1''(L) = 0, \quad w_1'''(L) = 0.$$

Функция $w_1(x)$ записывается в виде

$$w_1(x) = \frac{AAmx}{k^4 EJ} + \frac{AAm \left(\frac{1}{2} \sinh(kx) + \frac{1}{2} \sin(kx) \right)}{k^5 EJ} +$$

$$AAm \left(-\sin(kL) - \cos(kL) - \left(e^{kL} \right)^2 \sin(kL) + \left(e^{kL} \right)^2 \cos(kL) \right) \cdot$$

$$\left(\frac{1}{2} \cosh(kx) - \frac{1}{2} \cos(kx) \right) / \left(k^5 EJ \left(2e^{kL} + \cos(kL) + \left(e^{kL} \right)^2 \cos(kL) \right) \right) +$$

$$\frac{\left(\left(e^{kL} \right)^2 - 1 \right) AAm \sin(kL) \left(\frac{1}{2} \sinh(kx) - \frac{1}{2} \sin(kx) \right)}{k^5 EJ \left(2e^{kL} + \cos(kL) + \left(e^{kL} \right)^2 \cos(kL) \right)},$$

где $AA = \varphi_* p^2 / 2\pi$. Описание движения с учетом первой моды колебаний основано на методе главных координат, в соответствии с которым первая главная координата находится из уравнения

$$\frac{d^2 q_1}{dt^2} + \omega_1^2 q_1 = \frac{Q_1(t)}{M_1}, \quad (13)$$

где ω_1 – частота первого тона колебаний; $Q_1 = -\int_0^L f(x, t) w_1(x) dx$ –

обобщенная сила; $M_1 = \int_0^L m w_1^2(x) dx$ – обобщенная масса. После определения

Q_1 и M_1 и решения уравнения (13), перемещение, скорость и ускорение с учетом первой моды колебаний вычисляются таким образом:

$$W_1(x, t) = w_1(x) \cdot q_1(t), \quad \dot{W}_1(x, t) = w_1(x) \cdot \dot{q}_1(t), \quad \ddot{W}_1(x, t) = w_1(x) \cdot \ddot{q}_1(t).$$

Решение уравнения (13):

$$q_1 = -\frac{\sin(\omega_1 t) Q_1(t) p}{\omega_1 (\omega_1^2 - p^2)} + \frac{\sin(pt) Q_1(t)}{\omega_1^2 - p^2}.$$

Пример. Исходные данные: длина $L = 4$ м; $\varphi_* = 1$ рад. Частота первого тона собственных колебаний $\omega_1 = (1,875)^2 \sqrt{EJ/m/L^2}$.

На **Рис.8** изображены функции перемещения, скорости и ускорения в относительном движении (упругие колебания). В конце движения (при $t = T_c$) наступает абсолютный покой. С устранением колебаний руки в точке позиционирования устраняются погрешности, которые могут возникнуть при ее изгибных колебаниях.

В случае оптимального вращательного движения руки в дифференциальном уравнении, описывающем относительное движения (колебания), меняется правая часть. При этом форма колебаний, в связи с изменением значений произвольных постоянных, отличается от формы колебаний при поступательном переносном движении, но алгоритм аналитических преобразований остается прежним и качественная картина относительного движения аналогична предыдущей.

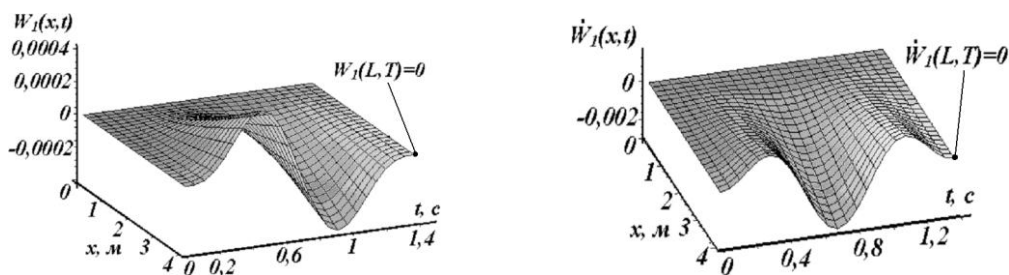


Рис.8 – Графики функций: $W_1(x, t)$ – перемещение, $\dot{W}_1(x, t)$ – скорость

Выводы. При совмещении вращательного и поступательного движений руки манипулятора с использованием метода стабилизации частоты собственных колебаний достигается абсолютный покой схвата в конечной точке движения.

Данный подход может использоваться и для стабилизации жесткости антропоморфных манипуляторов. При этом для повышения адекватности модели следует учитывать распределенные массы элементов руки. Конфигурация руки должна непрерывно меняться так, чтобы частота собственных колебаний была постоянной. Предложенный способ стабилизации жесткости рук может практически реализовываться с использованием пневмоприводов.

Библиографический список

1. Солодовников В.В. Основы теории и элементы системы автоматического регулирования: учеб. пособие / Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. – М. Машиностроение, 1985. – 536 с.
2. Карновский И.А., Почтман Ю.М. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем. – Киев: Донецк: Виша школа, 1982. – 116 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т.6, Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова, 1981. – 456 с.
4. Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем. – М.: Машиностроение, 1980. – 276 с.

5.Генкин М.Д., Елезов В.Г. Яблонский В.В. Методы управляемой виброзащиты машин. – М.: Наука, 1985. – 240 с.

6.Бохонский А.И., Варминская Н.И., Мозолевский М.И. Оптимальное управление движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / под. общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.

7.Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bohonsky, S.Y. Zobkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.

8.Бохонский А.И., Варминская Н.И., Мозолевская Т.В. Управление движением системы с заданными частотами. Механика, автоматика и робототехника. Материалы международной научно-практической конференции. Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – №2. – С.7 – 13.

9.Aleksandr Bokhonsky. Modelling and investigation of descents – Continues vibrating mechatronic systems with damping. Monographic / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Andrzej Wrobel. – Wydawnictwo Politechniki, Gliwice, 2013 – 207 p.

10.Бохонский А.И., Реверсионный принцип оптимальности: монография / под общ. ред. А.И. Бохонского. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016 – 174 с.

11.Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления. Монография. Palmarium Academic Publishing, 2013 – 84 с.

12.Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов. Материалы международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 38 – 41.

13.Бохонский А.И., Исаев А.В. Поиск управлений колебаний упругих объектов в системе аналитических вычислений. – Оптимизация производственных процессов. Вып. 10: сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 48-51.

14.Бохонский А.И. Варминская Н.И. Вариационные и реверсионные исчисления в механике: монография/ под. Общ. Ред. А. И. Бохонского. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.

Bibliograficheskiy spisok

1.Solodovnikov V.V. Fundamentals of the theory and elements of the automatic control system: studies. allowance / Solodovnikov V.V., Plotnikov V.N., Yakovlev A.V. - M. Mechanical Engineering, 1985. – 536 p.

2.Karnovsky I.A., Pochtman Yu.M. Methods for optimal control of oscillations of deformable systems. - Kiev: Donetsk: Visha School, 1982. – 116 p.

3.Vibrations in the technique: a Handbook. In 6 t. - M.: Mashinostroenie, 1981. - T.6 Protection against vibration and shock / ed. K.V. Frolova, 1981. – 456 p.

4.Frolov K.V., Furman F.A. Applied theory of vibration protection systems. - M.: Mashinostroenie, 1980. – 276 p.

5.Genkin MD, Elezov V.G. Yablonsky V.V. Methods of controlled vibration protection of machines. - M.: Science, 1985. – 240 p.

6.Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Mozolevsky M.I. Optimal control of the movement of deformable objects: theory and mechanical applications / under. total ed. A.I. Bohonsky. - Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2007. – 296 p.

7.Bokhonsky A.I. Modeling and A.I. Bohonsky, S.Y. Zobkiewski. - Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.

8.Bohonsky A.I., Varminskaya N.I., Mozolevsky T.V. Motion control system with given frequencies. Mechanics, automation and robotics. Materials of the international scientific-practical conference. Novokuznetsk: SIC MS, 2018. – №2. – p. 7 - 13.

9.Aleksandr Bokhonsky. Modeling and investigation of descents - Continues vibrating mechatronic systems with damping. Monographic / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Andrzej Wrobel. - Wydawnictwo Politechniki, Gliwice, 2013. – 207 p.

10.Bokhonsky A.I., Reversive principle of optimality: monograph / under total. ed. A.I. Bohonsky. - M.: University textbook: INFRA-M, 2016. – 174 p.

11.Bohonsky A.I. Actual problems of the calculus of variations. Monograph. Palmarium Academic Publishing, 2013. – 84 p.

12.Bohonsky A.I. The energy intensity of managing the movement of objects. Materials of the international scientific practical conference. - Novokuznetsk: SIC MS, 2017. – p. 38 - 41.

13.Bohonsky A.I., Isaev A.V. Search for oscillation control of elastic objects in the system of analytical calculations. - Optimization of production processes. Issue 10: Sat. scientific tr. - Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2007. – p. 48-51.

14.Bohonsky A.I. Varminskaya N.I. Variational and reverse calculus in mechanics: monograph / under. total ed. And I. Bokhonsky. - Sevastopol: SevNTU, 2012. – 212 p.

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

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

STABILIZATION OF THE FREQUENCY OF VIBRATIONS OF THE TELESCOPIC HAND OF A MANIPULATOR WHEN COMBINING MOVEMENTS

A.I. Bohonsky, M.M. Maystrishin

A method for stabilizing the rigidity of the manipulator's telescopic arm when changing its length, based on the rotation of the arm elements around the longitudinal axis, is proposed and investigated. This allowed us to use the laws of optimal control, which are applied to the hand with constant natural frequencies.

Key words: Elastic telescopic arm, its extension, stabilization of stiffness, optimal rotation control.

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ПРИВОДА (ГИП) УСТРОЙСТВ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Вожжов А.А.¹

Аннотация. Приведена математическая модель динамической системы устройства ударного действия, позволяющая исследовать работу динамической системы, установить зависимости выходных характеристик от параметров гидравлического привода и конструктивных параметров рассматриваемых устройств, управлять производительностью за счет изменения частоты срабатывания, обеспечить максимальную частоту осуществления рабочих ходов исполнительного звена.

Ключевые слова. Гидромолот, ударно-вибрационное воздействие, вибрации, гидравлика.

Введение. В настоящее время в строительстве, для разрушения каменных и бетонных блоков, твердых покрытий, забивки свай и труб широкое применение находят машины ударного действия.

Устройства ударного действия представляют собой энерго-преобразующие элементы силовых импульсных систем, приводимых от различных первичных источников энергий (электрической, пневматической, гидравлической). Современная практика, прогнозы развития и совершенствования использования подобных устройств показывают, что наиболее эффективным является применение машин ударного действия реализующих импульсные технологии [1,6,7].

Производительность подобных машин во многом определяется научно-обоснованным выбором режимов работы и конструктивных параметров исполнительных органов, поэтому задачи исследования и выбора рациональных параметров динамической системы устройства ударного действия являются актуальными.

Цель исследования – исследовать работу динамической системы, установить зависимости выходных характеристик от параметров гидравлического привода и конструктивных параметров устройств ударного действия.

В гидродинамических системах между насосом и подвижной массой устанавливается силовая связь, реализуемая при воздействии на нее струи жидкости [2]. В гидрообъемных системах формирование движущей силы происходит в результате подачи жидкости в замкнутую рабочую камеру переменного объема, что приводит к возникновению в этой камере импульсов давления, воздействующих на некоторую площадь подвижного поршня-ударника. Для разработки приближенных аналитических методов задач проектирования вибрационного оборудования с ГИП целесообразно проводить

дополнительный анализ динамической модели подсистемы гидроимпульсного привода [3].

На первом этапе срабатывания гидросистемы энергоноситель подается в полости рабочих цилиндров. Этот этап состоит из двух стадий. Первая отвечает переходному процессу в гидросистеме при неподвижных звеньях виброустановки, когда давление в гидросистеме не достигает величины давления p_0 , достаточного для преодоления сил стационарного сопротивления. Вторая стадия соответствует относительному перемещению исполнительного звена, в результате увеличения давления в гидросистеме до величины p_1 ($p_1 > p_0$) срабатывает запорный элемент вибровозбудитель.

Функционирование машин ударного действия имеет сложный характер и включает совокупности состояний, режимов и динамических процессов. Существенная неравномерность потребления мощности первичного привода, высокая частота, при которой рабочий цикл состоит из суммы неустановившихся процессов; наличие упругости жидкости затрудняют расчет параметров и исследование исполнительных органов машин ударного действия, функциональная часть которых представляет собой динамическую систему, подверженную действию различных по знаку и величине силам.

На втором этапе происходит соединение полостей исполнительных гидроцилиндров со сливным баком и падения давления в гидросистеме до величины p_2 при открытом запорном элементе вибровозбудителя. Основываясь на результатах анализа динамики ГИП и используя общую методику анализа переходных процессов в гидро-приводах машин ударного действия с характерной подачей, исследуемую систему можно представить в виде одномассовой динамической модели (Рис.1).

В гидродинамических системах между насосом и подвижной массой устанавливается силовая связь, реализуемая при воздействии на нее струи жидкости. В гидрообъемных системах формирование движущей силы происходит в результате подачи жидкости в замкнутую рабочую камеру переменного объема, что приводит к возникновению в этой камере импульсов давления, воздействующих на некоторую площадь подвижного поршня – ударника.

При математическом описании динамических процессов в устройстве ударного действия были приняты следующие допущения: реальная рабочая жидкость с распределенными параметрами заменяется моделью с сосредоточенными параметрами; плотность рабочей среды во всем объеме выделенной полости, распределяется равномерно; все узлы и детали устройства ударного действия считаются абсолютно жесткими, а взаимодействие бойка и инструмента не рассматривается; упругость рабочей среды рассматривается в полостях устройства ударного действия, а масса рабочей жидкости в трубопроводах приводится к выходному звену.

В рассматриваемой модели объединены массы жидкости в подсистеме гидроимпульсного привода и подвижных звеньев виброустановки M_{np} для сечения f_{nl} гидроцилиндра линейного перемещения. Жесткости $K_{\Sigma ж}$, K_y и

коэффициенты демпфирования $C_{\Sigma ж}$, $\xi_{\Sigma ж}$ так же рассмотрены для сечения $f_{нл}$. Перемещение объединенной массы M_{np} вдоль сводной координаты Y_{np} соответствует относительному движению.

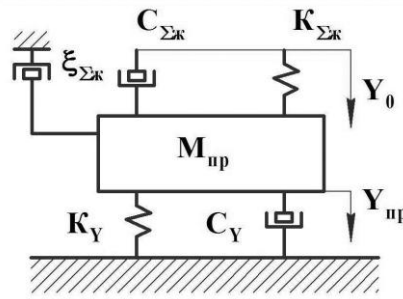


Рис.1 – Динамическая модель переходного процесса в подсистеме гидроимпульсного привода при подключении исполнительного звена «на выходе» [4]

Используя известную методику [3], закономерность изменения давления в полости гидроцилиндра $p_u(t)$ на первом этапе срабатывания гидросистемы можно записать:

$$p_u(t) = K_{\Sigma ж} \frac{Y_0 - Y_{np}}{f_{нл}}, \quad (1)$$

$$Y_0 = \frac{Q_H}{f_{нл}} (\tau_{зан} + t) = \frac{Q_H}{f_{нл}} t. \quad (2)$$

Для рассматриваемой динамической модели (Рис.1) перемещение в момент времени $\tau_{зан}$, соответствует началу перемещения массы M_{np} ($Y_{np}=0$), упругого звена $K_{\Sigma ж}$ усилием $R_{mnp} = K_{\Sigma ж} Y_0(\tau_{зан})$, которое определяется усилием предварительного натяжения элементов упругого возврата.

Поэтому уравнение движения массы M_{np} можно записать в виде

$$M_{np} \ddot{Y}_{np} + \xi_{\Sigma ж} \dot{Y}_{np}^2 + (C_{\Sigma ж} + C_y) \dot{Y}_{np} + (K_y + K_{\Sigma ж}) Y_{np} = K_{\Sigma ж} Y_0. \quad (3)$$

Применение линеаризации [2, 3] позволяет получить общее решение уравнения (3)

$$Y_{np} = \frac{K_{\Sigma ж}}{K_{\Sigma ж} + K_y} \cdot \frac{Q_H}{f_{нл}} \cdot t' - \frac{K_{\Sigma ж}}{K_{\Sigma ж} + K_y} \cdot \frac{Q_H}{f_{нл}} \cdot \sqrt{\frac{M_{np}}{K_{\Sigma ж} + K_y}} \cdot \frac{e^{-\beta \sqrt{\frac{K_{\Sigma ж} + K_y}{M_{np}}} \cdot t}}{\left(\sqrt{1 - \beta^2}\right)^3} \cdot \sin \sqrt{\frac{K_{\Sigma ж} + K_y}{M_{np}}} \cdot \sqrt{1 - \beta^2} \cdot t. \quad (4)$$

При малых $\beta = 0$ закономерность изменения давления в соответствии с (1) можно представить выражением:

$$p(t) = \frac{K_y Y_{def}}{f_{нл}} + \frac{K_{\Sigma ж} \cdot K_y}{K_{\Sigma ж} + K_y} \cdot \frac{Q_H}{f_{нл}^2} \cdot t + \frac{K_{\Sigma ж}^2}{K_{\Sigma ж} + K_y} \cdot \frac{Q_H}{f_{нл}^2} \cdot \sqrt{\frac{M_{np}}{K_{\Sigma ж} + K_y}} \cdot \sin \sqrt{\frac{K_{\Sigma ж} + K_y}{M_{np}}} \cdot t. \quad (5)$$

В гидроимпульсных приводах с вибровозбудителем "на выходе" максимальное давление в полости гидроцилиндра соответствует давлению p_1 срабатывания запорного элемента вибровозбудителя, выбираться в пределах [5]

$$\frac{K_y Y_{\text{оэф}}}{f_{\text{нл}}} < p_1 < 1.1 \frac{K_y Y_{\text{оэф}}}{f_{\text{нл}}}. \quad (6)$$

График процесса набора давления показан на **Рис.2**.

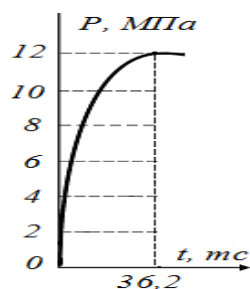


Рис.2 – График процесса набора давления в подсистеме ГИП

Выводы. Гидравлические связи, устанавливаемые в гидрообъемных системах, допускают управление ими с помощью различного рода золотников и клапанов. Однако, представленные расчёты показывают, что управлять производительностью можно за счет изменения частоты срабатывания, обеспечить максимальную частоту осуществления рабочих ходов исполнительного звена при выполнении условия (3).

Библиографический список

1. Пашков, Е. Н., Зиякаев Г. Р., Кузнецов И. В. Дифференциальные уравнения процессов гидроимпульсного силового механизма бурильных машин / Пашков Е. Н., Зиякаев Г. Р., Кузнецов И. В. // Приволжский научный вестник. — 2013. — № 4 (20). — с. 32–36.
2. Бочаров Ю.Д. Основы общей теории гидравлических кузнечно-штамповочных машин // Машины и технология обработки металлов давлением. — М., 1980. — С.12 - 40 — (Тр. МВТУ; № 335).
3. Булига Ю.В., Искович-Лотоцкий Р.Д., Манжілевський О.Д. Математичне моделювання гідроімпульсного приводу стенду для створення просторового вібронавантаження Вісник СевНТУ— випуск 117/2011. — с. 60 – 63.
4. Гидропривод сваепогружающих и грунтоуплотняющих машин / М.Е. Иванов, И.Б. Матвеев, Р.Д. Искович-Лотоцкий и др. — М.: Машиностроение, 1977. —174 с.
5. Искович-Лотоцкий Р.Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Р.Д. Искович-Лотоцкий, И.Б. Матвеев, В.А. Крат. — К.: Техніка, 1982. —208 с.
6. Первухина Е.Л., Осипов К.Н., Рапакский Ю.Л. К вопросу совершенствования методики приемосдаточных испытаний ДВС // Проблемы машиностроения и надежности машин, РАН, Россия. — 2012. — № 6. — С. 89-96.
7. Osipov K., Pervukhina E., Rapatskii Y. Improvement of the acceptance test procedure for the external combustion engine after assembly by using the relationship between diagnostic parameters, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2011, Vol. 40, N 2, pp. 171-175. © Allerton Press, Inc., 2011.

Bibliograficheskiy spisok.

1. Pashkov, E. N., Ziyakaev G. R., Kuznetsov I. V. Differentsialnyie uravneniya protsessov gidroimpulsного silovogo mehanizma burilnyih mashin / Pashkov E. N., Ziyakaev G. R., Kuznetsov I. V. // Privolzhskiy nauchnyiy vestnik. — 2013. — # 4 (20). — s. 32–36.
2. Bocharov Yu.D. Osnovyi obschey teorii gidravlicheskih kuznechno-shtampovochnyih mashin // Mashinyi i tehnologiya obrabotki metallov davleniem. — M., 1980. — S.12 - 40 — (Tr. MVTU; # 335).
3. Buliga Yu.V., Iskovich-Lototskiy R.D., Manzhilevskiy O.D. Matematichne modelyuvannya gidroimpulsного privodu stendu dlya stvorenniya prostorovogo vlbironavanta-zhennya VIsnik SevNTU— vipusk 117/2011. — s. 60 — 63.
4. Gidroprivod svaepogruzhayuschiy i gruntouplotnyayuschiy mashin / M.E. Ivanov, I.B. Matveev, R.D. Iskovich-Lototskiy i dr. — M.: Mashinostroenie, 1977. —174 s.
5. Iskovich-Lototskiy R.D. Mashinyi vibratsionnogo i vibroudarnogo deystviya / R.D. Iskovich-Lototskiy, I.B. Matveev, V.A. Krat. — K.: TehnIka, 1982. —208 s.
6. Pervukhina E. L., Osipov K. N., Rapatsky On the issue of improving the technique of acceptance testing of mechanical engineering and reliability of machines, RAS, Russia. - 2012. - № 6. - P. 89-96.
7. Osipov K., Pervukhina E., Rapatskii Y. Improvement of the acceptance test procedure for the external combustion engine after assembly by using the relationship between diagnostic parameters, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2011, Vol. 40, N 2, pp. 171-175. © Allerton Press, Inc., 2011.

Вожжов Андрей Анатольевич, старший преподаватель кафедры Приборные системы и автоматизация технологических процессов, 0506773532@mail.ru, Россия, г. Севастополь, Севастопольский государственный университет.

RESEARCH OF THE DYNAMICS OF A HYDRO PULSE DRIVE OF SHOCK ACTION DEVICES

A.A. Vozhzhov

A mathematical model of the dynamic system of the percussion device is given, which allows to investigate the dynamic system, determine the dependencies of the output characteristics on the parameters of the hydraulic drive and the design parameters of the devices under consideration, control the performance by changing the trigger frequency, ensure the maximum frequency of working strokes of the executive link.

Key words: Hydrohammer, shock and vibration effects, vibrations, hydraulics.

Vozhzhov Andrey Anatolyevich, Senior Lecturer, Instrument Systems and Automation of Technological Processes, 0506773532@mail.ru, Sevastopol, Russia, Sevastopol State University.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ НАГРУЖАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО СТЕНДА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Осипов К.Н.¹, Шмидт Л.А.², Коломийченко В.П.³

Аннотация. *Предлагается автоматизированное нагружающее устройство для испытательных стендов, позволяющее в ходе приемосдаточных и контрольных испытаний двигателей внутреннего сгорания моделировать различные, в том числе нелинейные, законы нагружения. Преимуществом предлагаемого устройства является то, что оно позволит ускорить процесс отыскания скрытых производственных дефектов уже на стадии производственных испытаний.*

Ключевые слова. *Испытания, нагружающее устройство, диагностика, моделирование, автоматизация.*

Введение. Необходимое непрерывное обеспечение конкурентоспособности отечественных изделий машиностроения, в том числе автомобильной и двигателестроительной промышленности на внутренних и мировых рынках, ставит перед производством новые задачи совершенствования существующих технологий изготовления, сборки и испытаний новых выпускаемых изделий. При этом особенный интерес представляют задачи совершенствования технологий и методов производственных испытаний, поскольку этот процесс является завершающим этапом, в ходе которого экспериментальным путем оценивается качество выпускаемой продукции. Достоверность результатов испытаний во многом определяет надежность, конкурентоспособность и себестоимость выпускаемых изделий [1,2].

Обзор научной и технической литературы последних лет показал, что основное внимание в области испытаний уделяется вопросам математического и программного обеспечения, например, работы [1-5]. При этом большинство предлагаемых подходов не учитывают технические аспекты, связанные, например, с возможностями современных отечественных стендов моделировать различные режимы работы испытуемых изделий. Так, например, в работе [6] доказывается, что наискорейшее отыскание дефектов в новых двигателях внутреннего сгорания и дизелях на этапе приемосдаточных испытаний возможно только при измерении диагностических параметров на неустановившихся режимах работы изделий, приближенных к реальным режимам эксплуатации, для имитации которых необходимо изменять тормозной момент на валу двигателя по следующей формуле:

$$M_T = \left(\frac{J^* - J_T}{J_M + J^*} \right) M_K + \left(\frac{J^* - J_T}{J_M + J^*} \right) M_\Sigma, \quad (1)$$

где M_T – тормозной момент, M_K – крутящий момент на валу ДВС, M_Σ – суммарный момент сопротивления, имитирующий сопротивление дороги, J^* – момент инерции, имитирующий момент инерции автомобиля, J_M – момент инерции движущихся деталей двигателя, J_T – момент инерции тормоза.

Однако в применяемых в настоящее время испытательных стендах реализация закона нагружения (1) практически невозможна из-за того, что устройства отбора мощности построены на базе электродвигателей постоянного тока, управление которыми осуществляется применением устаревших, недостаточно эффективных схем на базе электромашинных усилителей. Конечно, отдельные отечественные предприятия используют автоматизированные стенды, построенные на базе современных сервоприводов, а также асинхронных электрических машин со встроенным программным обеспечением (ПО) с функциями контроля значений отдельных показателей, тем не менее, такие стенды, к сожалению, производят исключительно за рубежом. Использование дорогостоящих зарубежных стендов позволяет увеличить достоверность испытаний и повысить конкурентоспособность выпускаемых изделий, но это не решает задачи в целом и расходится с курсом правительства на внедрение импортозамещающих технологий в отечественной промышленности, т.к. оснащение станочного парка предприятий оборудованием зарубежного образца подрывает технологическую независимость страны.

Целью данной работы является создание конструкции нагружающего устройства стенда для автоматизированных испытаний двигателей внутреннего сгорания, позволяющего моделировать нестационарные режимы нагружения.

Современные нагружающие устройства содержат следующие основные элементы: асинхронную электрическую машину с фазным ротором, который подключен к неуправляемому блоку вентиля, ведомый сетью инвертор, дроссель, токоограничивающие реакторы, микроэлектронный преобразователь Холла, источник выпрямленного тока, понижающий трансформатор, коммутационный аппарат, переключающее устройство, блок выбора режима, датчик скорости, устройство согласования, датчик тока, регуляторы момента и скорости, блок ключей, регулятор тока, систему импульсно-фазового управления инверторов (например, патент РФ №2032889, класс G01M15/00 «Нагружающее устройство стенда для испытаний ДВС»).

Работа таких нагружающих устройств основывается на изменении характеристик питающего переменного тока (амплитуды и частоты) в обмотках статора электродвигателя. Нагружающее устройство позволяет поддерживать двигательный режим (холодной обкатки ДВС) и генераторный режим, т.е. режим динамического торможения (горячей обкатки ДВС). Основным преимуществом данной компоновки устройств является снижение пульсаций крутящего момента асинхронного электродвигателя и, как следствие, скорости вращения ротора в ходе испытаний двигателей малой мощности. Недостатком является отсутствие возможности реализовывать нагружение испытуемых ДВС по заданным сложным законам в автоматическом режиме, а также режимов

нагружения, имитирующих работу ДВС, например, в составе транспортных средств, оборудованных автоматическими коробками перемены передач. При этом под сложными законами нагружения понимают законы нагружения, описываемые нелинейными уравнениями, в том числе алгебраическими.

Для решения технической задачи построения компоновочной схемы автоматизированного устройства отбора мощность в качестве прототипа выбрано нагружающее устройство стенда для испытаний ДВС содержащее асинхронную электрическую машину с трехфазным статором и фазным ротором, динамометрическую муфту, датчики количества оборотов вала двигателя, муфты и валы для согласования электродвигателя с испытуемым ДВС, частотный преобразователь типа «Altivar 61», пассивный фильтр и сетевой дроссель. Частотный преобразователь «Altivar 61» оборудован модулем постоянного тока (неуправляемый выпрямитель), силовым импульсным инвертором и модулем управления, который сопрягается со стационарной ЭВМ. Силовой трехфазный импульсный инвертор, включенный в состав частотного преобразователя «Altivar 61», состоит из шести транзисторных ключей [2].

Недостатком устройства является неосуществимость воспроизведения реальных режимов нагружения двигателей, которые возникают при их эксплуатации в составе транспортных средств, оборудованных автоматическими коробками передач. Кроме этого, сложность вызывает реализация управляющего сигнала (задающего напряжения), поступающего на вход частотного преобразователя «Altivar 61» из-за отсутствия в штатной комплектации современных ЭВМ плат расширения, позволяющих формировать управляющие сигналы в виде напряжения, изменяющегося по заданному закону (например, с заданной частотой, периодом и амплитудой).

Для устранения указанных недостатков, присущих прототипу, предлагается преобразователь частоты «Altivar 61» заменить преобразователем частоты Lenze 8400 HLC057, а асинхронную электрическую машину с фазным ротором заменена на асинхронный электрический мотор с короткозамкнутым ротором. Дополнительно предлагается встроить в конструкцию блок питания на 24 и 5 В, блок управления на базе микроконтроллера Arduino, содержащий микроконтроллер ArduinoUno, цифро-аналоговый преобразователь и драйвер управления двигателями постоянного тока, используемый для увеличения мощности выходного управляющего сигнала. Для воспроизведения реальных режимов нагружения предлагается использовать гидромеханическую коробку перемены передач модели 4R100 – E совместно с штатной системой управления, устанавливаемая на автомобили с двигателем мощностью до 120 кВт.

Регулирование скорости вращения ротора и развиваемого крутящего момента исполнительного механизма (асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором) предлагается осуществлять векторным методом с обратной связью, а именно изменением величины (амплитуды) и частоты питающего напряжения согласно требуемому закону нагружения (1). Управление гидромеханической коробкой перемены передач осуществляется с

помощью сервоприводов путем регулирования давления рабочей жидкости согласно закону нагружения (1).

Структурная схема предлагаемого нагружающего устройства стенда для испытаний ДВС изображена на **Рис.1**, где приняты следующие обозначения: асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 1, зубчатая муфта 2, динамометрическая муфта 3, гидромеханическая коробка перемены передач 4, испытуемый двигатель 5. В качестве динамометрической муфты 3 выбран датчик момента серии ТРА производства ЗАО «ПРОМДИАОБОРУДОВАНИЕ» с встроенным цифро-аналоговым преобразователем и интерфейсов RS-2312С, позволяющим обеспечивать непосредственное сопряжение с ПЭВМ. На валу асинхронного электродвигателя установлен стандартный датчик количества оборотов 6 (тахогенератор ТГ-5), который подключен к системе управления 7 и преобразователю частоты 8, который в свою очередь соединен с асинхронным электродвигателем 1.

Преобразователь частоты 8 подключен к модулю задания управляющего сигнала 9, к сети переменного напряжения 220В через пассивный фильтр 10 и сетевой дроссель 11, а также блоку питания низким напряжением (24 В) 12. Гидромеханическая коробка перемены передач подключена к системе управления 7 через блок управления 13. Блоки управления 9 и 13 питаются от блока питания 12. Устройство работает следующим образом.

Устройство нагружения предусматривает два принципиально разных режима работы: режим генерации мощности (режим привода) и режим отбора мощности (режим нагружения). Конкретный режим работы определяется оператором испытаний, используя модуль управления 9, путем выбора необходимой программы испытаний, которая заранее программируется с использованием ЭВМ 7. Традиционный процесс испытаний, например, согласно ГОСТ Р 14868 – 88, предусматривает следующую последовательность операций. На первом этапе оператор испытаний, используя устройство 9, запускает программу холодной обкатки ДВС.

После завершения процесса холодной обкатки оператор включает систему зажигания ДВС и насос подачи топлива на пульте управления стендом для испытаний ДВС, в составе которого работает полезная модель. В момент запуска ДВС преобразователь частоты 8 автоматически переходит в режим подхвата мощности, после этого асинхронный электродвигатель 1 переходит в генераторный режим работы. В ходе генераторного режима работы электродвигателя 1 блок управления 9 формирует управляющие воздействие (напряжение в диапазоне от 0 до 10 В), исходя из заданных законов нагружения, которые передаются в преобразователь частоты по каналу связи U_3 .

Преобразователь частоты 8 в зависимости от управляющего воздействия формирует величину переменного напряжения нужной частоты и амплитуды, которое по каналу U, f передается к обмоткам статора электродвигателя 1. В зависимости от величины переменного напряжения U и от частоты f электродвигатель развивает требуемый момент сопротивления. Момент

сопротивления от электродвигателя через муфту 2 передается на ведущий вал гидромеханической коробки перемены передач 4. Гидромеханическая коробка перемены передач преобразует момент сопротивления, развиваемый электродвигателем, в требуемый согласно закону нагружения (1) тормозной момент. Проверка соответствия реализуемого режима управления заданному режиму осуществляется с помощью каналов обратной связи M_k и n .

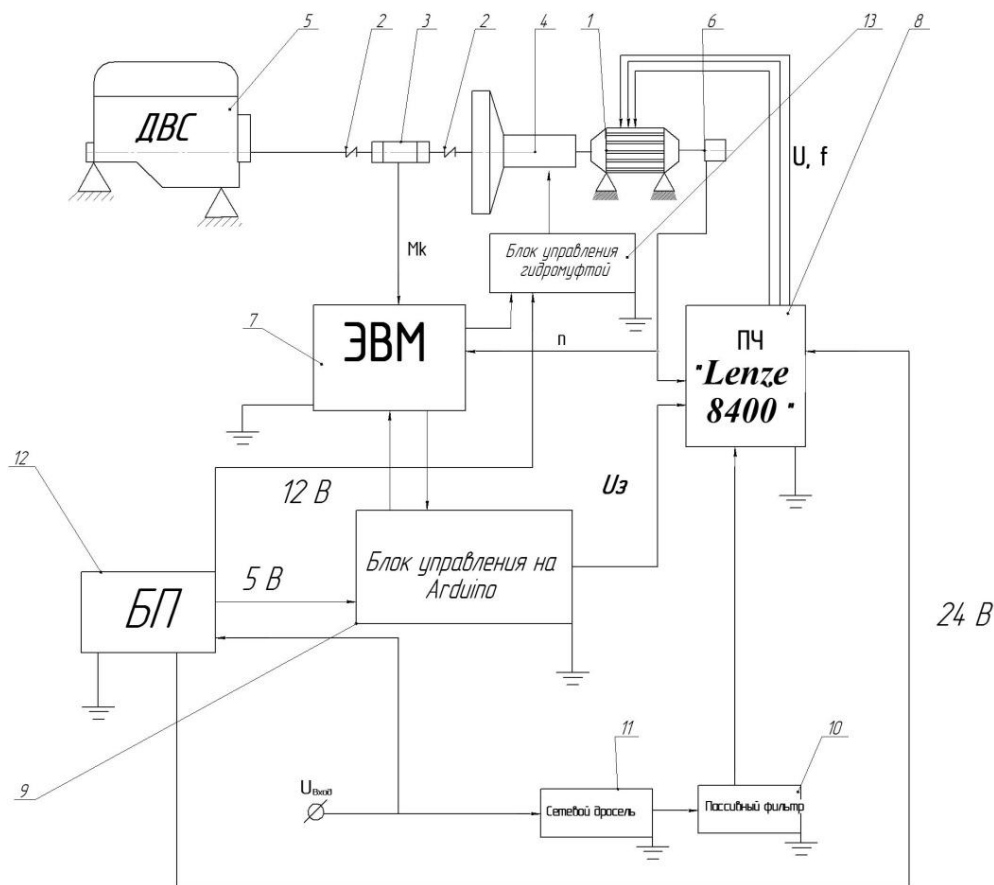


Рис.1 – Схема устройства

Программирование требуемого режима работы электродвигателя 1 осуществляется на ЭВМ 7, используя свободное программное обеспечение Arduino.

Выводы. Использование предлагаемого автоматизированного нагружающего устройства позволит повысить эффективность испытаний двигателей внутреннего сгорания за счет обеспечения возможности реализовывать различные законы нагружения, что позволит уже на стадии производственных (контрольных и приемосдаточных) испытаний выполнять оценку работоспособности новых двигателей в сложных условиях будущей эксплуатации и выявить скрытые дефекты.

Библиографический список

1. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с;

2. Соколов Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Теория систем и управления, 2004. – № 6. – С. 5-16;
3. Майданович О.В. Интеллектуальные технологии автоматизированного мониторинга сложных технических объектов / О.В. Майданович // Труды СПИИРАН, 2013. – Вып. 6(29). – С. 201-216;
2. Халиуллин Ф.Х., Особенности составления диагностической матрицы Байеса при безразборной диагностики двигателей внутреннего сгорания / Халиуллин Ф.Х., Ахметзянов И.Р. // Международный научно-исследовательский журнал, 2016. – № 5 (47); – С. 205-209;
3. Халиуллин Ф.Х. Оценка предельной наработки двигателя по величине компрессии в цилиндре / Ф.Х. Халиуллин, И.Р.Ахметзянов // Вестник Казанского ГАУ, 2016. – №1 (39). – С.96-98;
4. Рыжиков Ю.И. Проблемы теории и практики имитационного моделирования / Ю.И. Рыжиков, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика», 2007. – С.58-71;
5. Соколов Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Теория систем и управления, 2004. – № 6. – С. 5-16;
6. Pervukhina, E., Osipov, K., Golikova, V. (2015) Lowering toxic concentrations in the diesel exhaust gases // Communications in Computer and Information Science, Special Issue “Optimization in the Natural Sciences,” pp. 118-128;
7. Патент Украины № 63767, класс G01M 15/00, «Навантажувальний пристрій стенда для випробувань двигунів внутрішнього згорання».

Bibliograficheskij spisok

- Ohtilev. M.-Y. Intellektualnye-tehnologii-monitoringa-i-upravleniya-strukturnoj-dinamikoj-slozhnyh-tehnicheskix-obektov-m-yu-ohtilev-b-v-sokolov-r-m-yusupov-m-nauka-2006-410-s;
- 2-Sokolov B.B; Konceptualnye-osnovy-ocenivaniya-i-analiza-kachestva-modelej-i-polimodelnyh-kompleksov-b-v-sokolov-r-m-yusupov-teoriya-sistem-i-upravleniya-2004-6-s-5-16;
- 3-Majdanovich O.V. Intellektualnye-tehnologii-avtomatizirovannogo-monitoringa-slozhnyh-tehnicheskix-obektov-o-v-majdanovich-trudy-spiiran-2013-vyp-6-29-str-201-216;
- 2-Haliullin F.H Osobennosti-sostavleniya-diagnosticheskoy-matricy-bajesa-pri-bezrazbornoj-diagnostiki-dvigatелеj-vnutrennego-sgoraniya-haliullin-f-h-ahmetzyanov-i-r-mezhdunarodnyj-nauchno-issledovatel'skij-zhurnal-2016-5-47 s-205-209;
- 3-Haliullin F.H. Ocenka-predelnoj-narabotki-dvigatelya-po-velichine-kompressii-v-cilindre-f-h-haliullin-i-r-ahmetzyanov-vestnik-kazanskogo-gau-2016-1-39-s-96-98;

4. Ryzhikov Yu. L. Problemy-teorii-i-praktiki-imitacionnogo-modelirovaniya-yu-i-ryzhikov-b-v-sokolov-r-m-yusupov-sbornik-trudov-iii-vserossijskoj-nauchno-prakticheskoy-konferencii-imitacionnoe-modelirovanie-teoriya-i-praktika-2007-s-58-71;
- 5 Sokolov B.V. Ronceptualnye-osnovy-ocenivaniya-i-analiza-kachestva-modelej-i-polimodelnyh-kompleksov-b-v-sokolov-r-m-yusupov-teoriya-sistem-i-upravleniya-2004-6-s-5-16
6. Pervukhina E., Osipov K., Golikova V. Lowering-toxic-concentrations-in-the-diesel-exhaust-gases-communications-in-computer-and-information-science-special-issue-optimization-in-the-natural-sciences-pp-118-128;
7. Patent ukrainy 63767 klass g01m-15-00 navantazhuvalnij pristr j stenda dlya-viprobuvan dvigun vnutrshnogo zgoryannya.

Осипов Константин Николаевич – к.т.н., доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», Россия, г. Севастополь, ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, assistenttmm@mail.ru.

Шмидт Людмила Анатольевна – к.т.н., доцент кафедры «Физика и общетехнические дисциплины», Россия, г. Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С. Нахимова.

Коломийченко В.П. – ст. преподаватель кафедры «Физика и общетехнические дисциплины», Россия, г. Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С. Нахимова.

AUTOMATIC LOADING DEVICE STANDS FOR TESTING OF INTERNAL COMBUSTION INJECTION ENGINES

Osipov K.N., Schmidt L.A., Kolomuchenko V.P.

The new device for the automatic testing internal combustion engine is proposed. The new device can be uses for the modeling difficult loading during automatics testing modern internal combustion engines.

Osipov Konstantine – PhD of Sevastopol State university, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university assistenttmm@mail.ru.

Schmidt Ludmila – PhD of Nakhimov Blacks Sea Higher Naval School, Russia, Sevastopol, Nakhimov Blacks Sea Higher Naval School.

Koloniychenko V.P. - Senior Lecturer of Nakhimov Blacks Sea Higher Naval School, Russia, Sevastopol, Nakhimov Blacks Sea Higher Naval School.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУИ ВОЗДУХА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ТЕНЗОБАЛКУ

Васютенко А.П.¹, Ефремова Л.В.², Тараховский А.Ю.³

Аннотация. Приведен анализ технических и метрологических характеристик пневматических измерительных преобразователей, дана оценка их достоинств и недостатков, сформулирована цель работы – теоретическое обоснование комбинированного пневмотензометрического преобразователя для линейных измерений. Представлена схема и описание работы преобразователя, схема турбулентной струи и выражение, описывающее зависимость давления скоростного напора струи воздуха на тензобалку от расстояния между торцем измерительного сопла и тензобалкой.

Ключевые слова. Пневматический преобразователь, тензобалка, схема турбулентной струи, измерительное устройство, скоростной напор.

Введение. Основными направлениями 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, 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. Недостатком пневматических преобразователей является дискретный выходной электрический сигнал, не позволяющий производить обработку результатов измерения. В связи с этим представляется целесообразным исследовать комбинированный пневмоэлектрический преобразователь, включающий в себя пневматический струйный и тензометрический преобразователи.

Цель исследования. Теоретическое исследование комбинированного пневмотензометрического преобразователя, обеспечивающего получение аналогового выходного электрического сигнала.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих научно-практических задач: исследование струйных пневматических преобразователей для линейных измерений; исследование усилия воздействия струи воздуха пневматического измерительного преобразователя на тензобалку. Схема пневмотензометрического преобразователя для контроля диаметра деталей показана на **Рис.1**. С поверхностью детали 1 контактирует измерительный штوك 2, с которым связана измерительное сопло 3. Воздух под постоянным давлением P_1 подводится к измерительному соплу от блока

подготовки воздуха, включающего в себя фильтр 4, регулятор–стабилизатор давления воздуха 5 и манометр 6. Струя воздуха, истекающего из сопла 3, воздействует на балку 7 с усилием F_x , величина которого зависит от зазора x между торцом сопла и тензобалкой. Величина деформации балки 7 измеряется наклеенным на нее тензопреобразователем 8. Сигнал преобразователя обрабатывается электронным блоком 9 и отображается на показывающем устройстве 10. Таким образом, пневмотензометрический преобразователь осуществляет преобразование изменения диаметра детали в перемещении сопла, что вызывает изменение усилия воздействия струи воздуха на балку, ее деформацию и, соответственно, изменение сопротивления тензометрического преобразователя.

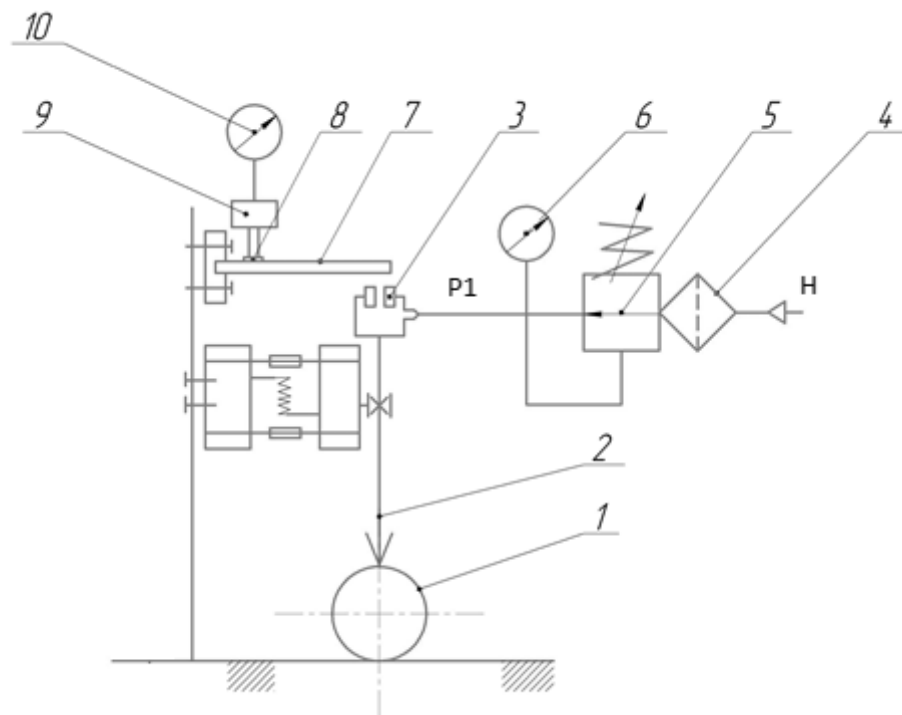


Рис.1 – Схема пневмотензометрического преобразователя

На **Рис.2** показана схема преобразования сигнала измерительной информации в пневмотензометрическом преобразователе, где $K_1 = \Delta x / \Delta d$ – передаточное отношение измерительной оснастки; $K_2 = \Delta F_x / \Delta x$ – передаточное отношение струйного пневматического преобразователя; $K_3 = \Delta l / \Delta F_x$ – передаточное отношение к тензобалке; $K_4 = \Delta R / \Delta l$ – передаточное отношение тензометрического преобразователя. Общее передаточное отношение преобразователя равно:

$$K_{\text{общ}} = K_1 K_2 K_3 K_4 = \Delta R / \Delta d.$$

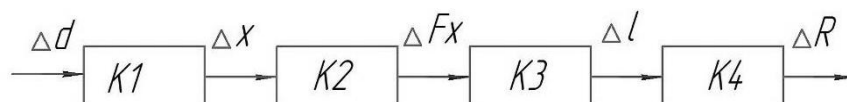


Рис.2 – Схема преобразования сигнала измерительной информации

Полное статическое давление во всех сечениях струи является величиной постоянной и равной давлению покоящейся среды. В связи с наличием поперечной составляющей скорости движения частиц турбулентная струя состоит из двух частей: начального и основного участков (**Рис.3**). Начальный участок включает ядро постоянных скоростей и пограничный слой. Скорость во всех точках ядра постоянных скоростей одинакова и равна скорости истечения частиц из сопла. Ядро постоянных скоростей представляет собой конус имеющим своим основанием выходное сечение сопла.

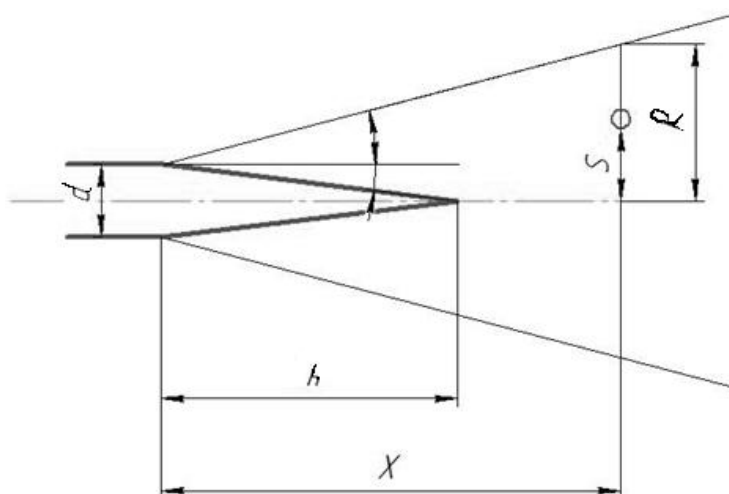


Рис.3 – Участки струи

В пограничном слое, скорость частиц меняется от максимальной, равной скорости частиц в ядре постоянных скоростей, до нуля. Толщина пограничного слоя увеличивается от нуля (в выходном сечении сопла) до ширины струи на конце начального участка[1].

Основной участок, представляет собой сплошь пограничный слой. На основном участке длина уменьшается с увеличением расстояния от выходного сечения сопла. Для упрощения схемы турбулентной струи, наиболее широко используемой при расчетах, характерны следующие соотношения:
длина начального участка

$$h \cong 5 \cdot d_c, \quad (1)$$

где d_c – диаметр выходного отверстия сопла; $\alpha/2$ – угол наклона внешней границы струи; $\beta/2$ – угол наклона границы ядра постоянных скоростей;
ширина пограничного слоя для начального участка струи:

$$R = 0,252x, \quad (2)$$

где x – расстояние по оси до выходного отверстия сопла [2];

ширина пограничного слоя (полуширина струи) для основного участка струи

$$R = \frac{d_c}{2} + 0,152x. \quad (3)$$

При расчете скоростей в любой точке струи используется формула Шлихтинга:

$$\frac{v}{v_{oc}} = \left[1 - \left(\frac{S}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2, \quad (4)$$

где v_{oc} – скорость на оси струи в сечении, проходящем через выбранную точку; S – расстояние от выбранной точки до границы ядра постоянных скоростей (для начального участка) или до оси струи (для основного участка); R – ширина пограничного слоя.

Скорость по оси струи изменяется следующим образом. Для начального участка

$$\frac{v}{v_{oc}} = 1, \quad (5)$$

для основного участка:

$$\frac{v}{v_{oc}} = \frac{1}{0,3 + 0,14 \cdot \frac{x}{d_c}}. \quad (6)$$

Давление скоростного напора в струе прямо пропорционально квадрату скорости. Если обозначить P_1 – давление питания, подводимого к соплу, P_2 – давление в любой точке струи, то для начального участка струи имеем

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v}{v_{oc}} \right) = \left[1 - \left(\frac{S}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^4; \quad (7)$$

для основного участка

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 = \left(\frac{\left[1 - \left(\frac{S}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2}{0,3 + 0,14 \cdot \frac{x}{d}} \right)^2. \quad (8)$$

С учетом (3) и (2) для начального участка получаем

$$\frac{P_2}{P_1} = \left[1 - \left(\frac{S}{0,252x} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^4, \quad (9)$$

для основного участка:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\left[1 - \left(\frac{2S}{d + 0.304x} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2}{0.3 + 0.14 \frac{x}{d}} \right)^2. \quad (10)$$

Для нахождения усилия воздействия струи воздуха на тензобалку необходимо определить диапазон начального участка. Величина h лежит пределах $0 < h < dc/4$, поскольку при $h = dc/4$ площадь поперечного сечения сопла $S_{\Pi} = \pi d_c^2/4$ становится равной площади боковой поверхности кольцевого зазора $S_K = \pi d_c x$. Эксперименты показывают, что на практике заслонка оказывает дросселирующее действие при расстояниях $h = (1.4 \div 1.6) d_c / 4$ [3, 4].

Силу реакции струи потока на заслонку обычно стремятся уменьшить за счет уменьшения диаметра сопла, давления питания и т.д. Расход газа через рассматриваемое сопротивление при турбулентном режиме течения можно найти, пользуясь формулами для турбулентных дросселей (11 – 14). Массовый расход газа может быть рассчитан по формуле для докритического режима $G = v_2 \cdot \rho_2 \cdot F$, где ρ_2 – плотность воздуха после отверстия, F_c – площадь проходного сечения сопла.

Выражение (11) справедливо для соотношения давлений $\frac{P_2}{P_1} \geq 0,528$.

$$G = \mu \cdot F_c \cdot P_1 \sqrt{\frac{2}{RT_1} \cdot \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (11)$$

Формула для расчета надкритического истечения газа получается из (11) путем подстановки вместо P_2/P_1 отношение $(P_2/P_1)_{кр}$, т.е.:

$$G = \mu \cdot F_c \cdot P_1 \sqrt{\frac{2}{RT_1} \cdot \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (12)$$

Выражение (11) справедливо для соотношения давлений P_2 и P_1 $\frac{P_2}{P_1} \leq 0,528$

Выражения (11) и (12) носят название формул Сен-Венана-Ванцеля. Расход при надкритическом истечении зависит от давления перед дросселем P_1 и не зависит от давления дросселя P_2 .

При расчете и проектировании систем пневмоавтоматики для нахождения массового расхода воздуха через дроссели при турбулентном режиме течения применимы более простые формулы. Для докритического истечения, когда $P_2/P_1 \geq 0,5$

$$G = \mu \cdot F_c \cdot P_1 \sqrt{\frac{2}{RT_2} \cdot \left[\frac{P_2}{P_1} - \left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right) \right]}, \quad (13)$$

а для надкритического истечения, когда $P_2/P_1 \leq 0,5$

$$G = \mu \cdot F_c \cdot P_1 \sqrt{\frac{1}{2RT_2}}. \quad (14)$$

Для расчета расходной характеристики дросселя сопло-заслонка необходимо определить значение коэффициента расхода. Коэффициент расхода определяют экспериментально, как отношение действительного расхода к теоретическому, т.е. $\mu = G_d / G_T$, и находят его зависимость от числа Рейнольдса Re и отношения давлений P_2/P_1 . Отношение давлений эквивалентно числу Маха:

$$M = \left(\frac{2}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Сила, развиваемая чувствительным элементом, соизмерима с силой, действующей на заслонку со стороны сопла; поэтому величину этой силы необходимо учитывать. Величина силы складывается из двух составляющих $F_x = F_{x1} + F_{x2}$, где F_{x1} – реактивная сила, возникающая при попадании потока воздуха на тензобалку и растекании его по поверхности заслонки при повороте на угол 90° ; F_{x2} – сила, возникающая от статического давления, действующего на тензобалку [5, 6, 7].

При малых зазорах силу реакции струи на заслонку можно вычислить так:

$$F_x = \frac{G^2}{\pi \cdot r^2 \cdot \rho} + \pi \cdot r^2 (P_1 - P_2) + \left[2\pi \int_r^R P_1 \cdot r dr - \pi \cdot P_2 (R^2 - r^2) \right], \quad (15)$$

где G – массовый расход, $r = d_c/2$ – радиус сопла, R – радиус торца сопла, ρ – плотность воздуха.

Выражение (15) после вычисления интеграла:

$$F_x = \frac{G^2}{\pi \cdot r^2 \cdot \rho} + \pi \cdot r^2 (P_1 - P_2) + [\pi P_1 \cdot (R^2 - r^2) - \pi \cdot P_2 (R^2 - r^2)] \quad (16)$$

Давление струи является переменным в каждой точке начального участка и определяется из выражения (9) при $S=R$:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(1 - \frac{R}{0,252x} \right),$$

следовательно:

$$P_2 = P_1 \left(1 - \frac{R}{0,252x} \right). \quad (17)$$

Полученное выражение подставляем в (16)

$$F_x = \frac{G^2}{\pi \cdot r^2 \cdot \rho} + \pi \cdot r^2 \left[P_1 - P_1 \left(1 - \frac{R}{0,252x} \right) \right] + \left[\pi P_1 \cdot (R^2 - r^2) - \pi \cdot P_1 \left(1 - \frac{R}{0,252x} \right) R^2 - r^2 \right] \quad (18)$$

Выводы. Используя выражение (18), возможно определить искомое усилие F_x воздействия струи воздуха пневматического измерительного преобразователя на тензобалку, представляющую собой консольно закрепленную пластину с наклеенными на нее тензопреобразователями. Изменение зазора между торцем измерительного сопла и пластиной приводит к изменению усилия F_x , что в свою очередь вызывает изменение деформации пластины, проволочного или фольгированного тензопреобразователя и, соответственно, изменение его сопротивления.

В дальнейшем представляет интерес моделирование работы пневмотензометрического преобразователя при различных сочетаниях исходных данных (давлении воздуха P_1 , диаметре сопла d_c , радиусе торца R) и оценка его метрологических характеристик, таких как, чувствительность и диапазон измерения.

Библиографический список

- 1.Елимелех И.М., Сидоркин Ю.Г. Струйная автоматика (пневмоника).– Л.: изд-во ЛЕНИЗДАТ, 1972. – 160с.
- 2.Залманзон Л. А., Пневмоника.– М.: Изд-во АН СССР, 1964. – 280с.
- 3.Дмитриев В. Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики.– М.: «Машиностроение», 1973. – 360с.
- 4.Высоцкий А.В. Пневматические измерения линейных размеров/А. В. Высоцкий, А.П. Курочкин, А.Б. Линд и др. – М.: Государственное научно-техническое издательство, 1987. – 206 с.
- 5.Васютенко А.П. Дроссельный пневматический преобразователь типа «сопло-приемный канал» / А.П. Васютенко, Л.В.Ефремова , А.Ю. Тараховский // Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки, Том 3, North Charleston, USA, 12-13 декабря 2016г. – С 109-114
- 6.Ким А.Ю. Применение программы "пневматика" для расчета пневматических сооружений на статические и динамические нагрузки / А.Ю. Ким, С.А. Топорищев // В книге: Молодой ученый: вызовы и перспективы Сборник статей по материалам VII международной научно-практической конференции. Ответственный редактор: Красовская Н.Р., 2016. – С. 239-243.
- 7.Васютенко А.П. Моделирование характеристик пневматического преобразователя «сопло–приемный канал» / А.П. Васютенко, Л.В.Ефремова // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения материалы междунар. науч. - техн. конф. Севастополь, 11-15 сентября 2017 года. С. 122-124.

Bibliograficheskii spisok

- 1.Elimelekh I.M., Sidorkin Iu.G. Struinaia avtomatika (pnevmonika).– L.: izd-vo LENIZDAT, 1972. – 160s.
- 2.Zalmanzon L. A., Pnevmonika.– M.: Izd-vo AN SSSR, 1964. – 280s.
- 3.Dmitriev V. N., Gradetskii V.G. Osnovy pnevmoavtomatiki.– M.: «Mashinostroenie», 1973. – 360s.
- 4.Vysotskii A.V. Pnevmaticheskie izmereniia lineinykh razmerov/A. V. Vysotskii, A.P. Kurochkin, A.B. Lind i dr. – M.: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo, 1987. – 206 s.
- 5.Vasiutenko A.P. Drosselnyi pnevmaticheskii preobrazovatel tipa «soplo-priemnyi kanal» / A.P. Vasiutenko, L.V.Efremova ,A.Iu. Tarakhovskii // Fundamentalnaia nauka i tekhnologii – perspektivnye razrabotki, Tom 3, North Charleston, USA, 12-13 dekabria 2016g. s 109-114
- 6.Kim A.Iu. Primenenie programmy "pnevmatika" dlia rascheta pnevmaticheskikh sooruzhenii na staticheskie i dinamicheskie nagruzki / A.Iu. Kim, S.A. Toporishchev // V knige: Molodoi uchenyi: vyzovy i perspektivy Sbornik statei po materialam VII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Otvetstvennyi redaktor: Krasovskaia N.R.. 2016. S. 239-243.
- 7.Vasiutenko A.P. Modelirovanie kharakteristik pnevmaticheskogo preobrazovatelia «soplo–priemnyi kanal» / A.P. Vasiutenko, L.V.Efremova // Avtomatizatsiia i priborostroenie: problemy, resheniia materialy mezhdunar. nauch. - tekhn. konf. Sevastopol, 11-15 sentiabria 2017 goda. S. 122-124

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

Ефремова Людмила Витальевна, инженер, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

Тараховский Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, AYTarakhovskiy@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

THE RESEARCH EFFORTS OF IMPACT OF THE JET OF AIR OF THE PNEUMATIC MEASURING CONVERTER FOR TENTALCE

Vasyutenko A.P., Efremova L.V., Tarakhovskiy A.Y.

The analysis of the technical and metrological characteristics of the pneumatic transducers, assessed their strengths and weaknesses, formulated the aim of this work is a theoretical substantiation of the combined pneumoenteritis transducer for linear measurements. A diagram and description of the operation of the Converter, the circuit of the turbulent jet and the expression describing the dependence of pressure velocity head of the jet air tentalce the distance between the end face of the measuring nozzle and censabella.

Key words: pneumatic converter, tensible scheme turbulent jet, the measuring device, the velocity head.

*Vasyutenko Alexander Pavlovich, Cand. tech. Sciences, associate Professor
vasutenko50@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University*

Efremova Lyudmila Vitalievna, engineer, Sevastopol, Russia, Sevastopol state University

*Tarakhovskaya Alexey Yurievich, Cand. tech. Sciences, associate Professor
AYTarakhovskiy@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University*

**СТАЦИОНАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ
НЕНАДЕЖНОЙ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ С МГНОВЕННО
ПОПОЛНЯЕМЫМ ВРЕМЕННЫМ РЕЗЕРВОМ**Песчанский А.И.¹

Аннотация. Объектом исследования является двухкомпонентная техническая система, элементы которой могут выходить из строя и восстанавливаться. Вышедший из строя элемент остается некоторое время функционально работоспособным за счет временного резерва, величина которого имеет случайный характер. Все случайные величины, описывающие систему, имеют распределения общего вида. Аппаратом для построения математической модели описанной системы является полумарковский процесс с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний. В явном виде находится стационарное распределение вложенной цепи Маркова. Для систем с параллельным соединением, последовательным соединением с отключением и без отключения элементов находятся стационарное время наработки системы на отказ, стационарное время пребывания в отказовом состоянии и стационарный коэффициент готовности системы. На численном примере показана зависимость стационарных характеристик системы от величины временного резерва.

Ключевые слова. Двухкомпонентная ненадежная система, временной резерв, стационарное распределение вложенной цепи Маркова, стационарный коэффициент готовности

Введение. Одним из методов повышения надежности технических систем является временное резервирование. Наличие временного резерва может рассматриваться как существование в системе еще одного элемента, который включается в работу на период неисправности основного элемента (расходуется резервное время) и простаивает во время исправной работы основного элемента (резерв времени не расходуется) [1–4]. Модели ненадежной однокомпонентной системы с мгновенно пополняемым резервом времени построены в [4–6]. В данной работе определяются стационарные надежностные характеристики для двухкомпонентной восстанавливаемой системы с временным резервом в предположении общего вида случайных величин, описывающих систему.

Постановки задачи. Рассмотрим систему, состоящую из двух ненадежных восстанавливаемых элементов. Предположим, что в начальный момент времени оба элемента системы работоспособны и начинают функционировать. Время безотказной работы i -го элемента — случайная величина (СВ) α_i с функцией распределения (ФР) $F_i(t)$, $i=1,2$. Сразу же после выхода элемента из строя начинается его восстановление, которое длится

случайное время β_i , с ФР $G_i(t)$, $i=1,2$. При этом элемент продолжает функционировать за счет временного резерва, который мгновенно пополняется в момент выхода из строя элемента и описывается СВ γ_i с ФР $R_i(t)$, $i=1,2$. Данное состояние не считается отказовым. Если неисправность элемента устраняется в течение временного резерва, то он снова включается в работу. В отказовое состояние элемент попадает только в том случае, когда полностью расходуется временной резерв, и его восстановление не завершено. После завершения ремонтных работ надежность характеристики элемента полностью восстанавливаются.

Предположим, что СВ α_i , β_i и γ_i независимы, имеют конечные математические ожидания $E\alpha_i$, $E\beta_i$, $E\gamma_i$ и дисперсии; существуют плотности распределения $f_i(t)$, $g_i(t)$, $r_i(t)$ и $0 < P(\beta_i < \gamma_i) < 1$.

Временная диаграмма функционирования системы в предположении, что в момент перехода в отказовое состояние одного из элементов не происходит отключения другого, изображена на **Рис.1**.

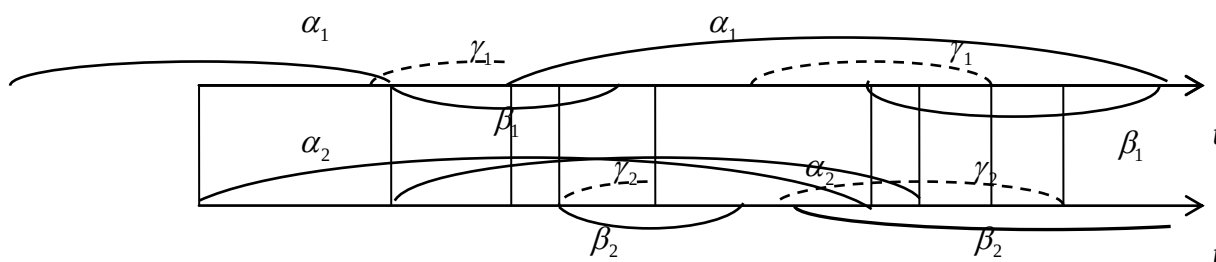


Рис.1 – Временная диаграмма функционирования системы

Понятие отказа системы зависит от ее структуры. При параллельном соединении элементов (дублированная с нагруженным резервом) система считается в отказе в случае, когда временные резервы обоих элементов исчерпаны, и они восстанавливаются. При последовательном соединении отказ системы происходит в момент расходования временного резерва одного из элементов.

Целью статьи является построение полумарковской модели функционирования описанной двухкомпонентной системы, и на ее основе определение следующих показателей качества функционирования системы: средней стационарной наработки на отказ $T(E_+)$, среднего стационарного времени пребывания в отказовом состоянии $T(E_-)$ и стационарного коэффициента готовности K_2 .

Построение полумарковской модели системы. Функционирование системы опишем с помощью полумарковского процесса $S(t)$ с дискретно-непрерывным множеством состояний [7,8]. Начнём с построения пространства E фазовых состояний системы. Каждый ее элемент может находиться в трех различных физических состояниях: 1 — функционировать в работоспособном

состоянии; 0 — восстанавливаться и функционировать за счет временного резерва; 2 — восстанавливаться и находится в отказовом состоянии. Физическое состояние системы будем кодировать двумерным вектором, компоненты которого указывают на физические коды состояний соответственно первого и второго элементов. Расширим состояния системы до полумарковских. Для этого перед кодом состояний системы укажем номер элемента, который изменил свое физическое состояние последним. После кода физического состояния k -го элемента, который не изменил свое состояние, добавим непрерывные компоненты, а именно: $1x_k$ — время x_k , оставшееся до выхода из строя элемента; $0z_k u_k$ — время z_k оставшегося резерва, время u_k , оставшееся до конца восстановления элемента; $2u_k$ — время u_k до конца восстановления. Например, состояние $(1, 0, 2u_2)$ означает, что первый элемент вышел из строя, началось его восстановление, он продолжает функционировать за счет резерва. При этом второй элемент находится в отказовом состоянии, до конца его восстановления осталось время u_2 .

Состояние $(2, 0z_1 u_1, 1)$ указывает на то, что последним восстановился второй элемент и включился в работу. В этот момент первый элемент функционирует за счет резерва, до израсходования которого осталось время z_1 , а до конца восстановления элемента осталось время u_1 . Состояние $(2, 2u_1, 2u_2)$ означает, что временной резерв второго элемента исчерпался, и он перешел в отказовое состояние, до конца его восстановления осталось время u_2 . При этом первый элемент продолжает восстанавливаться, до конца его восстановления осталось время u_1 .

Времена θ пребывания системы в состояниях определяются минимумом случайных и детерминированных величин в зависимости от состояния. Например, $\theta_{(1,0,2u_2)} = \beta_1 \wedge \gamma_1 \wedge u_2$, $\theta_{(2,0z_1 u_1,1)} = z_1 \wedge u_1 \wedge \alpha_2$, $\theta_{(2,2u_1,2u_2)} = u_1 \wedge u_2$.

Определим вероятности и плотности вероятностей переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{S_n, n \geq 0\}$. Учтем, что из физического состояния 1 элемент переходит в состояние 0, из состояния 0 — в состояния 1 или 2, из состояния 2 — в состояние 1.

Опишем, например, вероятности переходов из состояния $(2, 0z_1 u_1, 1)$. В зависимости от значения минимума величин $z_1 \wedge u_1 \wedge \alpha_2$ возможен переход в одно из следующих состояний:

1) если $z_1 < u_1$, $\alpha_2 \in z_1 + dx_2$, то

$$\frac{d}{dx_2} P\{(2, 0z_1 u_1, 1) \rightarrow (1, 2(u_1 - z_1), 1x_2)\} = f_2(z_1 + x_2), x_2 > 0;$$

запись $\alpha_2 \in z_1 + dx_2$ означает, что $z_1 + x_2 < \alpha_2 \leq z_1 + x_2 + dx_2$;

2) если $u_1 < z_1$, $\alpha_2 \in u_1 + dx_2$, то

$$\frac{d}{dx_2} P\{(2, 0z_1u_1, 1) \rightarrow (1, 1, 1x_2)\} = f_2(u_1 + x_2), x_2 > 0;$$

3) если $\alpha_2 < u_1 \wedge z_1 = z_1$, $\alpha_2 \in z_1 - dy$, то

$$\frac{d}{dy} P\{(2, 0z_1u_1, 1) \rightarrow (2, 0y(u_1 - z_1 + y), 0)\} = f_2(z_1 - y), y < z_1;$$

4) если $\alpha_2 < u_1 \wedge z_1 = u_1$, $\alpha_2 \in u_1 - dy$, то

$$\frac{d}{dy} P\{(2, 0z_1u_1, 1) \rightarrow (2, 0(z_1 - u_1 + y)y, 0)\} = f_2(u_1 - y), y < u_1.$$

Аналогично выписываются вероятности и плотности вероятностей переходов ВЦМ $\{S_n, n \geq 0\}$ для остальных состояний.

Стационарное распределение ВЦМ является решением системы интегральных уравнений, которая в матричной форме имеет вид [7]

$$\rho(B) = \int_E \rho(dz) P(z, B), \quad (1)$$

где $P(z, B)$ — вероятность перехода из состояния z во множество состояний B . Для рассматриваемого полумарковского процесса имеет место

Теорема. Стационарное распределение ВЦМ $\{S_n, n \geq 0\}$ определяется формулами

$$\rho(1, d_1(u_1), d_2(x_2, z_2, u_2)) = \rho_0 a_1(u_1) a_2(x_2, z_2, u_2), \quad (2)$$

$$\rho(2, d_1(x_1, z_1, u_1), d_2(u_2)) = \rho_0 a_1(x_1, z_1, u_1) a_2(u_2),$$

где $d_i(u_i) \in \{1, 0, 2u_i\}$; $d_i(x_i, z_i, u_i) \in \{1x_i, 0z_iu_i, 2u_i\}$; $\rho_0 = \text{const}$;

$$a_i(u_i) = \begin{cases} 1, & d_i(u_i) = 0, 1; \\ \int_0^\infty r_i(s) g_i(s + u_i) ds, & d_i(u_i) = 2u_i; \end{cases}$$

$$a_i(x_i, z_i, u_i) = \begin{cases} \bar{F}_i(x_i), & d_i(x_i, z_i, u_i) = 1x_i; \\ \int_0^\infty r_i(s + z_i) g_i(s + u_i) ds, & d_i(x_i, z_i, u_i) = 0z_iu_i, \\ \int_0^\infty r_i(s) \bar{G}_i(s + u_i) ds, & d_i(x_i, z_i, u_i) = 2u_i. \end{cases}$$

Доказательство. Справедливость утверждения теоремы проверяется непосредственной подстановкой выражений (2) в систему уравнений (1).

Убедимся в этом на примере одного из уравнений системы. Подставим в правую часть уравнения

$$\begin{aligned} \rho(1, 2u_1, 0z_2u_2) = & \int_0^{\infty} r_1(t)g_1(t+u_1)\rho(1, 0, 0(t+z_2)(t+u_2))dt + \\ & + \int_0^{\infty} r_2(t+z_2)g_2(t+u_2)\rho(2, 0t(t+u_1), 0)dt \end{aligned}$$

выражения

$$\rho(1, 0, 0(t+z_2)(t+u_2)) = \rho_0 \int_0^{\infty} r_2(s+t+z_2)g_2(s+t+u_2)ds,$$

$$\rho(2, 0t(t+u_1), 0) = \rho_0 \int_0^{\infty} r_1(s+t)g_1(s+t+u_1)ds.$$

В результате преобразований получим

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} r_1(t)g_1(t+u_1)\rho(1, 0, 0(t+z_2)(t+u_2))dt + \int_0^{\infty} r_2(t+z_2)g_2(t+u_2)\rho(2, 0t(t+u_1), 0)dt = \\ & = -\rho_0 \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_t^{\infty} r_1(s)g_1(s+u_1)ds \int_t^{\infty} r_2(s+z_2)g_2(s+u_2)ds \right\} dt = \\ & = \rho_0 \int_0^{\infty} r_1(s)g_1(s+u_1)ds \int_0^{\infty} r_2(s+z_2)g_2(s+u_2)ds = \rho(1, 2u_1, 0z_2u_2). \end{aligned}$$

Постоянная ρ_0 находится из условия нормировки и принимает значение

$$\rho_0 = \left[\sum_{i=1}^2 (2 + P(\gamma_{3-i} < \beta_{3-i}))(E\alpha_i + E\beta_i) \right]^{-1}.$$

Стационарные характеристики системы. Пусть фазовое пространство E системы представляется в виде объединения двух непересекающихся подмножеств E_+ и E_- т.е. $E = E_+ \cup E_-$, $E_+ \cap E_- = \emptyset$. К подмножеству E_+ относятся состояния, в которых система функционирует, а к подмножеству E_- — отказовые состояния.

Известно [7,8], что в случае существования единственного стационарного распределения ВЦМ $\{S_n, n \geq 0\}$, средние стационарные времена $T(E_+)$ и $T(E_-)$ пребывания системы соответственно в работоспособном и отказовом состояниях, а также коэффициент готовности системы K_2 , находятся по формулам:

$$T(E_+) = \frac{\int_{E_+} m(x) \rho(dx)}{\int_{E_+} P(x, E_-) \rho(dx)}, \quad T(E_-) = \frac{\int_{E_-} m(x) \rho(dx)}{\int_{E_-} P(x, E_+) \rho(dx)}, \quad K_2 = \frac{\int_{E_+} m(x) \rho(dx)}{\int_E m(x) \rho(dx)}, \quad (3)$$

где $m(x)$ – среднее время пребывания в состоянии $x \in E$.

Разбиение множества E на подмножество функционально работоспособных состояний E_+ и отказовых состояний E_- зависит от структуры системы. Рассмотрим случай **параллельного** соединения элементов (дублированная система с нагруженным резервом). В этом случае имеем $E_- = \{(1, 2u_1, 2u_2), (2, 2u_1, 2u_2)\}$, а к подмножеству E_+ относятся все остальные состояния системы. Найдем выражения функционалов, входящих в формулы (3). Имеем

$$\begin{aligned} \int_{E_+} m(x) \rho(dx) &= \int_0^\infty \int_0^\infty \rho(1, 2u_1, 2u_2) du_1 du_2 \int_0^{u_1 \wedge u_2} dt + \int_0^\infty \int_0^\infty \rho(2, 2u_1, 2u_2) du_1 du_2 \int_0^{u_1 \wedge u_2} dt = \\ &= \int_0^\infty dt \int_0^\infty r_1(s) \overline{G}_1(s+t) ds \int_t^\infty du \int_0^\infty r_2(y) \overline{G}_2(y+u) dy + \int_0^\infty dt \int_t^\infty du \int_0^\infty r_1(s) \overline{G}_1(s+u) ds \int_0^\infty r_2(y) \overline{G}_2(y+t) dy = \\ &= - \int_0^\infty \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_t^\infty du \int_0^\infty r_1(s) \overline{G}_1(s+u) ds \int_t^\infty du \int_0^\infty r_2(y) \overline{G}_2(y+u) dy \right\} = \int_0^\infty du \int_0^\infty r_1(s) \overline{G}_1(s+u) ds \times \\ &\quad \times \int_0^\infty du \int_0^\infty r_2(y) \overline{G}_2(y+u) dy = (E\beta_1 - E(\beta_1 \wedge \gamma_1))(E\beta_2 - E(\beta_2 \wedge \gamma_2)). \end{aligned}$$

Проводя алогичные преобразования для остальных функционалов, получим

$$\begin{aligned} \int_{E_-} m(x) \rho(dx) &= (E\alpha_1 + E(\beta_1 \wedge \gamma_1))(E\alpha_2 + E(\beta_2 \wedge \gamma_2)) + (E\alpha_1 + E(\beta_1 \wedge \gamma_1)) \times \\ &\quad \times (E\beta_2 - E(\beta_2 \wedge \gamma_2)) + (E\beta_1 - E(\beta_1 \wedge \gamma_1))(E\alpha_2 + E(\beta_2 \wedge \gamma_2)); \\ \int_E m(x) \rho(dx) &= (E\alpha_1 + E\beta_1)(E\alpha_2 + E\beta_2); \\ \int_{E_+} P(x, E_-) \rho(dx) &= \int_{E_-} P(x, E_+) \rho(dx) = \int_0^\infty \int_0^\infty [\rho(1, 2u_1, 2u_2) + \rho(2, 2u_1, 2u_2)] du_1 du_2 = \\ &= \int_0^\infty r_1(s) \overline{G}_1(s) ds \int_0^\infty du \int_0^\infty r_2(y) \overline{G}_2(y+u) dy + \int_0^\infty r_2(s) \overline{G}_2(s) ds \int_0^\infty du \int_0^\infty r_1(y) \overline{G}_1(y+u) dy = \end{aligned}$$

$$= P(\gamma_1 < \beta_1)(E\beta_2 - E(\beta_2 \wedge \gamma_2)) + P(\gamma_2 < \beta_2)(E\beta_1 - E(\beta_1 \wedge \gamma_1)) .$$

Обозначим $T_i^{(10)} = E\alpha_i + E(\beta_i \wedge \gamma_i)$ и $T_i^{(2)} = E\beta_i - E(\beta_i \wedge \gamma_i)$ — средние стационарные времена пребывания i -го элемента системы в функционально работоспособном и отказовом состояниях соответственно на периоде регенерации, т.е. между двумя соседними моментами попадания его в работоспособное состояние после восстановления. Тогда средние стационарные времена пребывания системы в функционально работоспособном и отказовом состояниях, стационарный коэффициент готовности системы определяются формулами

$$T(E_+) = \frac{(T_1^{(10)} + T_1^{(2)})(T_2^{(10)} + T_2^{(2)}) - T_1^{(2)}T_2^{(2)}}{P(\gamma_1 < \beta_1)T_2^{(2)} + P(\gamma_2 < \beta_2)T_1^{(2)}} ; \quad T(E_+) = \frac{T_1^{(2)}T_2^{(2)}}{P(\gamma_1 < \beta_1)T_2^{(2)} + P(\gamma_2 < \beta_2)T_1^{(2)}} ;$$

$$K_z = 1 - \prod_{i=1}^2 \frac{T_i^{(2)}}{T_i^{(10)} + T_i^{(2)}} = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - K_i) , \quad (4)$$

где $K_i = \frac{T_i^{(10)}}{T_i^{(10)} + T_i^{(2)}}$ — стационарный коэффициент готовности i -го элемента системы.

Предположим, что элементы системы соединены последовательно, и в момент перехода одного из них в отказовое состояние, не происходит отключения второго элемента. В этом случае подмножество функционально работоспособных состояний системы имеет вид

$$E_+ = \{(1,1,1x_2), (1,1,0z_2u_2), (1,0,1x_2), (1,0,0z_2u_2), (2,1x_1,1), (2,1x_1,0), (2,0z_1u_1,1), (2,0z_1u_1,0)\} ,$$

стационарные характеристики системы вычисляются по формулам

$$T(E_+) = \frac{T_1^{(10)}T_2^{(10)}}{P(\gamma_1 < \beta_1)T_2^{(2)} + P(\gamma_2 < \beta_2)T_1^{(2)}} ; \quad T(E_-) = \frac{T_1^{(10)}T_2^{(2)} + T_1^{(2)}T_2^{(10)} + T_1^{(2)}T_2^{(2)}}{P(\gamma_1 < \beta_1)T_2^{(2)} + P(\gamma_2 < \beta_2)T_1^{(2)}} ;$$

$$K_z = \prod_{i=1}^2 \frac{T_i^{(10)}}{T_i^{(10)} + T_i^{(2)}} = \prod_{i=1}^2 K_i . \quad (5)$$

Теперь рассмотрим систему с последовательным соединением элементов при условии, что в момент отказа одного из элементов происходит отключение второго. Будем предполагать, что после восстановления отказавшего элемента отключенный элемент включается в работу с тем же уровнем работоспособности, на котором его застало отключение. В этом случае подмножество функционально работоспособных элементов E_+^* такое же, как аналогичное подмножество E_+ для системы без отключений. Число состояний подмножества E_-^* уменьшается:

$$E_-^* = \{(1, 2u_1, 1x_2), (1, 2u_1, 0z_2u_2), (2, 1x_1, 2u_2), (2, 0z_1u_1, 2u_2)\},$$

и время пребывания в этих состояниях определяется формулами $\theta_{(1, 2u_1, 1x_2)} = \theta_{(1, 2u_1, 0z_2u_2)} = u_1$, $\theta_{(2, 1x_1, 2u_2)} = \theta_{(2, 0z_1u_1, 2u_2)} = u_2$. В результате преобразований выражений (3) находим

$$T(E_+^*) = \frac{T_1^{(10)}T_2^{(10)}}{P(\gamma_1 < \beta_1)T_2^{(2)} + P(\gamma_2 < \beta_2)T_1^{(2)}}; \quad T(E_-^*) = \frac{T_1^{(10)}T_2^{(2)} + T_1^{(2)}T_2^{(10)}}{P(\gamma_1 < \beta_1)T_2^{(2)} + P(\gamma_2 < \beta_2)T_1^{(2)}};$$

$$K_s = \frac{T_1^{(10)}T_2^{(10)}}{T_1^{(10)}T_2^{(10)} + T_1^{(10)}T_2^{(2)} + T_1^{(2)}T_2^{(10)}}. \quad (6)$$

Если в системе временной резерв постоянный, и для i -го элемента равен детерминированной величине h_i , то при вычислении стационарных характеристик системы в формулах (4)–(6) следует полагать

$$T_i^{(10)} = E\alpha_i + \int_0^{h_i} \overline{G_i}(t)dt,$$

$$T_i^{(2)} = \int_{h_i}^{\infty} \overline{G_i}(t)dt, \quad i = 1, 2.$$

Пример. Рассмотрим систему, в которой среднее время безотказной работы элементов равно $E\alpha_1 = 10$ час и $E\alpha_2 = 12$ час соответственно. Время восстановления первого элемента подчиняется закону Эрланга третьего порядка со средним значением $E\beta_1 = 1,5$ час. Время восстановления второго имеет распределение Рэлея с плотностью $g_2(t) = 0,5te^{-t^2/4}$ и средним значением $E\beta_2 = 1,77$ час. В таблице 1 приведены результаты вычислений по формулам (4)–(6) характеристик системы: стационарного времени $T(E_+)$ пребывания в функционально работоспособном состоянии, среднего стационарного времени $T(E_-)$ пребывания системы в отказовом состоянии, и стационарного коэффициента готовности K_s системы. Каждый элемент системы имеет неслучайный резерв времени, который изменяется от 0 час до 1,0 час с шагом 0,2 час.

Выводы. В работе с помощью аппарата полумарковских процессов с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний построена модель функционирования ненадежной двухкомпонентной системы с мгновенно пополняемым временным резервом. На ее основе получены расчетные формулы, позволяющие определить стационарные характеристики системы, и установить их зависимость от величины временного резерва.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 1.10513.2018/11.12), при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Самарской области в рамках научного проекта № 17-48-630410. Кроме этого, исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-01-00704

Таблица 1. – Влияние временного резерва на стационарные характеристики системы

h_1	h_2	K_c	Изменение хар-ки, отн.ед.,%	$T(E_+)$	Изменение хар-ки, отн.ед.,%	$T(E_-)$	Изменение хар-ки, отн.ед.,%
Параллельная система							
0	0	0,983	–	47,586	–	0,812	–
0,2	0,2	0,987	0,3	54,891	15,4	0,718	–11,6
0,4	0,4	0,990	0,7	66,063	38,8	0,641	–21,1
0,6	0,6	0,993	1,0	83,269	75,0	0,581	–28,5
0,8	0,8	0,995	1,2	109,678	130,5	0,532	–34,5
1,0	1,0	0,997	1,4	150,434	216,1	0,493	–39,3
Последовательная система без отключения элементов							
0	0	0,758	–	5,455	–	1,745	–
0,2	0,2	0,786	3,70	5,605	2,80	1,529	–12,3
0,4	0,4	0,813	7,40	5,912	8,40	1,356	–22,3
0,6	0,6	0,840	10,9	6,419	17,7	1,219	–30,1
0,8	0,8	0,866	14,2	7,159	31,2	1,111	–36,3
1,0	1,0	0,889	17,3	8,170	49,8	1,024	–41,3
Последовательная система с отключением элементов							
0	0	0,771	–	5,455	–	1,624	–
0,2	0,2	0,796	3,30	5,605	2,80	1,437	–11,5
0,4	0,4	0,821	6,60	5,912	8,40	1,286	–20,8
0,6	0,6	0,846	9,80	6,419	17,7	1,166	–28,2
0,8	0,8	0,870	12,9	7,159	31,2	1,072	–34,0
1,0	1,0	0,892	15,7	8,170	49,8	0,994	–38,8

Библиографический список

- 1.Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.
- 2.Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности.— 2-е изд., перераб. и доп.— СПб.:БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
- 3.Ushakov I.A. Probabilistic Reliability Models. – San Diego: Wiley, 2012. – 248 p.
- 4.Креденцер Б.П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью. – К.: Наук. Думка, 1978. – 240 с.

5.Копп, В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И.Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2000.– 286 с.

6.Песчанский А.И. Полумарковская модель ненадежной восстанавливаемой резервированной одноканальной системы обслуживания с потерями / А.И.Песчанский // Вестн. Самар. Гос. Техн. ун-та, сер. Техн. науки. – 2017. – №1(53). – С. 31–41.

7.Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.

8.Корлат А.Н. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.И. Новиков, А.Ф. Турбин. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 276 с.

Bibliograficheskiy spisok

1.Cherchesov, G.N. Nadezhnost tehnikeskikh system s vremennoy izbitochnostiyu. – М: Sov. radio, 1974. – 296 s.

2.Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovyi teorii nadezhnosti. – 2-e izd., pererab. i dop.– SPb.:BHV-Peterburg, 2006. – 704 s.

3.Ushakov, I.A. Probabilistic Reliability Models. – San Diego: Wiley, 2012. – 248 p.

4.Kredentser B.P. Prognozirovanie nadezhnosti system s vremennoy izbitochnostiyu. – Kiev: Nauk. dumka, 1978. – 240 s.

5.Kopp V.Ya. Stokhasticheskie modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh system s vremennym rezervirovaniem/ V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin, A.I. Peschanskiy. –Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2000. – 286 s.

6.Peschanskiy A.I. Polumarkovskaya model nenadezhnoy vosstanavliyaemoyi odnokanalnoy rezerviruemyi sistemy obsluzhivaniya s poteryami/A.I. Peschanskiy // Vestn. Samar. Gos. Tehn. un-ta, ser. Tehn. nauki. – 2017. –№1(53). – S. 31–41.

7.Korolyuk V.S., Tubin A.F. Protsessyi markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti system. Kiev: Nauk. dumka, 1982. – 236 s.

8.Korlat A.N. Polumarkovskie modeli vosstanavliyaemykh system i system massovogo obsluzhivaniya / A.N. Korlat, V.N. Kuznetsov, M.I. Novikov, A.F. Turbin. – Kishinev: Shtiintsa, 1991. – 276 с.

Песчанский Алексей Иванович, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры «Высшая математика» peschansky_sntu@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

STATIONARY CHARACTERISTICS OF A TWO-COMPONENT UNRELIABLE RESTORABLE SYSTEM WITH IMMEDIATELY REPLENISHED SLACK TIME

Peschansky A.I.

The object of the study is a two-component system. Its elements can fail and be restored. For some time, a failed element continues operating due to slack time of random value. All the random variables describing the system have general

distributions. The apparatus for constructing a mathematical model of the described system is a semi-Markov process with discrete-continuous phase state space. The stationary distribution of the embedded Markov chain is found explicitly. For parallel systems, serial systems with elements' disconnection and without it, system stationary time-to-failure, stationary sojourn time in failure state and system stationary availability factor are obtained. A numerical example shows the dependence of the system stationary characteristics on the value of slack time.

Key words: two-component unreliable system, slack time, stationary distribution of the embedded Markov chain, stationary availability factor.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБЛАЧНОГО ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ С КЭШ-ПАМЯТЬЮ

Копп В.Я.¹, Заморёнов М.В.¹, Шевченко В.И.¹

Аннотация. В статье приводится классификация систем хранения данных, позволяющая конкретизировать область исследования. При использовании аппарата полумарковских процессов строится математическая модель обработки запросов на запись данных к системе облачного хранения данных с кэш-памятью. В процессе построения полумарковской модели была получена функция распределения случайной величины – времени полной обработки запроса на запись данных. Для этого получено решение системы уравнений марковского восстановления, являющейся системой интегральных уравнений Вольтерры 2-го рода с полустохастическим ядром. Система решена операторным методом. Проведено сравнение математического ожидания времени полной обработки запроса на запись данных, полученного в результате моделирования, и математического ожидания, полученного по теореме о среднем стационарном времени пребывания полумарковского процесса в подмножестве состояний, для чего определено стационарное распределение вложенной цепи Маркова.

Ключевые слова. Полумарковский процесс, математическая модель, система облачного хранения данных, математическое ожидание.

Введение. На сегодняшний день информация является одним из основных стратегических, политических и конкурентных ресурсов современного предприятия. Объем информации удваивается каждые два года [1], вклад в этот рост вносит использование электронной почты, загрузка содержания и передача медиа-файлов, распространение социальных сетей, мобильных устройств, использование Интернета. Возрастающие объемы данных, циркулирующие в глобальных информационных сетях, требуют не только высокоскоростных и надежных каналов передачи, но и разработки эффективных систем хранения.

Современное автоматизированное производство представляет собой сложную иерархически подчиненную систему, состоящую из двух основных элементов: технологического комплекса и информационного ядра, обеспечивающего согласованное планирование, функционирование и обслуживание технологического комплекса. Функции информационного ядра значительно шире указанных, однако в данном случае ограничимся только функциями управления. Функционирование такой сложной иерархически подчиненной системы управления машиностроительным производством требует обработки большого объема данных.

Отметим, что простое увеличение физической емкости хранилищ не позволяет решать проблему обработки Больших Данных [2, 3], необходимо внедрение новых информационных технологий, таких как виртуализация, переход на облачное и гибридное хранение данных, обеспечивающее

одновременно производительность, масштабируемость и необходимый уровень обслуживания для внутренних или внешних клиентов систем хранения данных (СХД).

При этом в ряде случаев производительность таких систем влияет в значительной степени на производительность всего машиностроительного комплекса предприятия. В связи с этим особую актуальность приобретают проблемы связанные с определением производительности указанных систем. Отметим также, что математические модели позволяют не только определять производительность, но также и указывают на пути ее повышения. Основной характеристикой такой системы является время ожидания ответа на запрос – время отклика системы. Учитывая, что время отклика является случайной величиной, зависящей от ряда факторов различных для каждой конкретной реализации системы, то определение этого времени является непростой задачей.

Системный подход к проблеме, состоящей в моделировании процесса функционирования информационных систем, требует подробной их классификации. Проведенный анализ существующих систем хранения и их классификаций [4-9] позволил предложить классификацию, позволяющую конкретизировать область исследований.

Классификация систем хранения данных.

Ключевая характеристика любой вычислительной архитектуры для хранения данных – это способ подключения устройств хранения данных к целевой платформе. Различают два базовых способа подключения: прямое и по сети [8, 10].

Архитектура устройств хранения с непосредственным подключением к платформе (direct-attached storage – DAS) используется, когда устройство для хранения данных подключено непосредственно к серверу, или к рабочей станции, как правило, через интерфейс, начиная от стандартов ATA (Advanced Technology Attachment)–IDE (Integrated Drive Electronics), ATA–parallel SCSI и Fibre Channel, и включая новые интерфейсы, такие как SAS (serial attached SCSI), SATA (serial ATA) и eSATA (external SATA) [8]. Пример структуры хранения с прямым подключением приведен на рисунке 1.

В свою очередь, в зависимости от подключения к хост-компьютеру DAS-хранилища делятся на внутренние и внешние. Обе эти технологии являются достаточно бюджетными, с точки зрения стоимости и легко настраиваются при начальной установке. Однако такая архитектура существенно ограничена с точки зрения масштабирования, и, как следствие, мало применима в распределенных вычислительных системах [7, 11].

Второй тип архитектур СХД – системы хранения, подключаемые по сети. Доступ к данным через сеть можно получить одним из следующих способов: на уровне блоков, на уровне файлов или на уровне объектов.

При доступе на уровне блоков файловая система создается на базе вычислительных систем, а доступ к данным осуществляется через сеть на

уровне блоков. В этом случае для вычислительной системы назначаются необработанные диски или логические тома, для создания файловой системы.

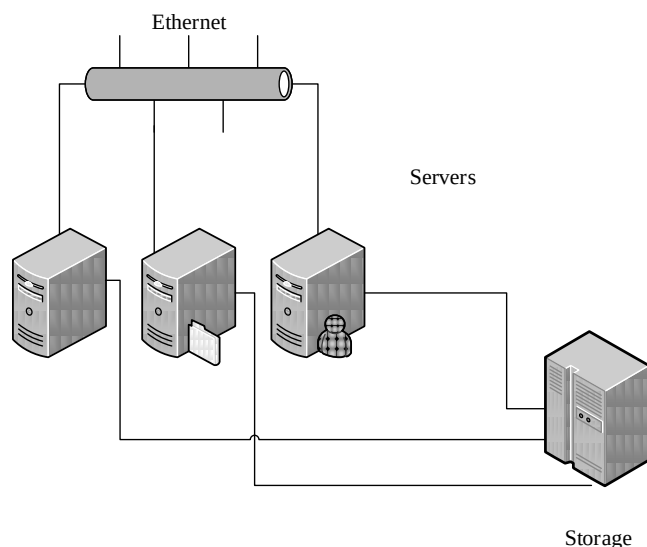


Рис.1 – Внешнее DAS хранилище

При доступе на уровне файлов файловая система создается на отдельном файловом сервере или на стороне СХД, а запрос на уровне файлов отправляется через сеть. Поскольку доступ к данным происходит на уровне файлов, этот метод имеет большие издержки по сравнению с доступом к данным на уровне блоков.

Доступ на уровне объектов – это более прогрессивный метод, при котором доступ к данным происходит через сеть с помощью автономных объектов с уникальными идентификаторами. При этом типе доступа пользовательский компонент файловой системы находится в вычислительной системе, а компонент хранения данных — в системе хранения. Общая схема доступа к данным СХД по сети приведена на **Рис.2**.

На основе типа доступа к данным система хранения может классифицироваться как блочная система, файловая система хранения, объектная система и унифицированная система хранения. Унифицированная система хранения предоставляет доступ к данным на основе блоков, файлов и объектов в одной системе.

Во многих источниках [7, 8] приводится альтернативная версия данной классификации: система хранения данных с прямым подключением (DAS); сетевая система хранения данных (Network Attached Storage – NAS); сеть хранения данных (Storage Area Network — SAN). Однако авторы в данной работе отдают предпочтение подходу на основе типа доступа к данным. Общая схема классификации интеллектуальных систем хранения данных приведена на **Рис.3**.

В статье рассматривается функционирование блочной СХД. Следует отметить еще одну архитектуру хранения, которая появилась сравнительно недавно, это – облачное хранилище. Облачное хранилище данных (англ. Cloud

Storage) – новый метод организации хранилищ, при котором принадлежащие компании или организации данные хранятся не в ее центрах обработки данных (ЦОД) или на одиночных серверах, а на большом количестве виртуальных серверов [7, 12].

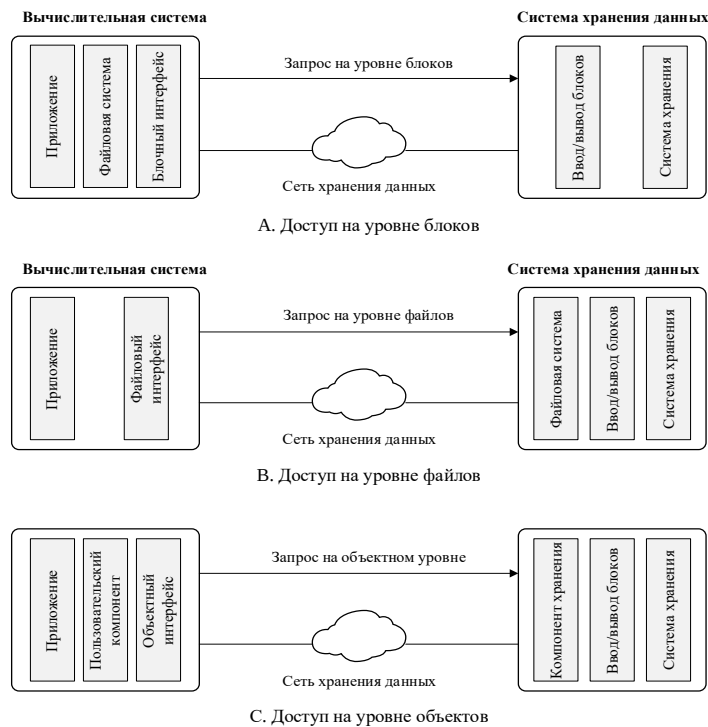


Рис.2 – Методы доступа к данным

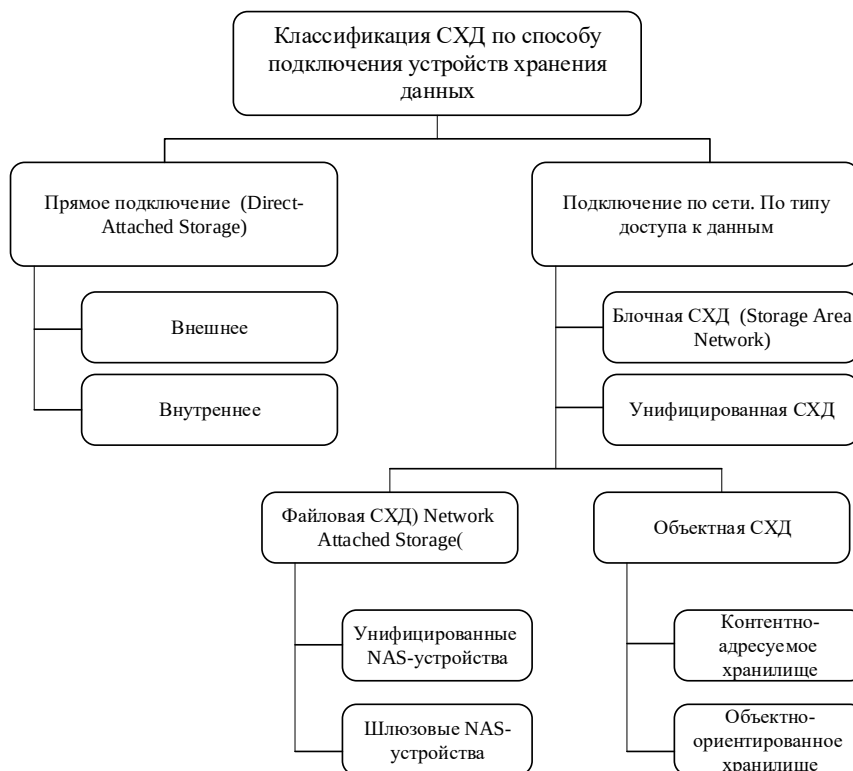


Рис.3 – Классификация систем хранения данных

Блочная система хранения данных. Предоставляет вычислительным системам доступ на уровне блоков к томам хранения данных. В этой среде файловая система создается на базе вычислительных систем, а доступ к данным осуществляется через сеть на уровне блоков. Блочная система хранения состоит из одного или нескольких контроллеров и системы хранения. В свою очередь контроллер системы хранения данных состоит из трех ключевых компонентов: клиентский интерфейс (внешние порты и контроллеры), кэш-память и серверная часть. Структура интеллектуальной системы хранения блочного типа приведена на **Рис.4**, подробное описание приведено в [7].

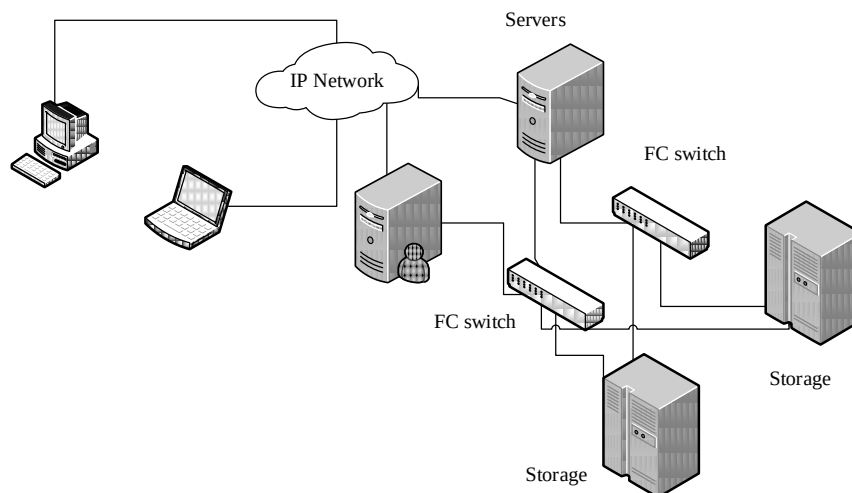


Рис.4 – Компоненты СХД блочного типа

Запрос ввода-вывода передается из вычислительной системы через внешний порт и обрабатывается с помощью кэш-памяти серверной части. Запрос чтения может обслуживаться непосредственно из кэш-памяти, если в ней обнаружены необходимые пользователю данные. В современных системах хранения клиентский интерфейс, кэш-память и серверная часть обычно интегрированы в единую панель (которую называют процессором СХД или контроллером системы хранения данных).

Клиентский интерфейс обеспечивает обмен данными между системой хранения и вычислительной системой. Он состоит из двух компонентов: внешних портов и внешних контроллеров. Обычно клиентский интерфейс имеет резервные контроллеры для обеспечения высокой доступности, а каждый контроллер содержит несколько портов, которые позволяют подключать множество вычислительных систем к интеллектуальной системе хранения данных.

Файловая система хранения. Система NAS предоставляет своим клиентам возможность получать общий доступ к файлам по IP-сети. Эта система обеспечивает преимущества консолидации серверов, поскольку исключает необходимость использовать несколько файловых серверов. Помимо этого, она консолидирует используемые клиентами ресурсы хранения данных в единую систему, упрощая тем самым управление этими ресурсами. Для

предоставления доступа к файловым данным система NAS использует сетевые протоколы и протоколы общего доступа к данным. Эти протоколы включают TCP/IP для передачи данных, а также CIFS и NFS для сетевого файлового сервиса. Устройство NAS использует собственную операционную систему, а также интегрированные аппаратные и программные компоненты для обеспечения соответствия требованиям файловых сервисов. Его операционная система оптимизирована для ввода-вывода файлов и поэтому выполняет его более эффективно, чем сервер общего назначения. В результате устройство NAS может обслуживать больше клиентов, чем серверы общего назначения, а также обеспечивает преимущества консолидации серверов. Обобщенно структура NAS приведена на **Рис.5**.

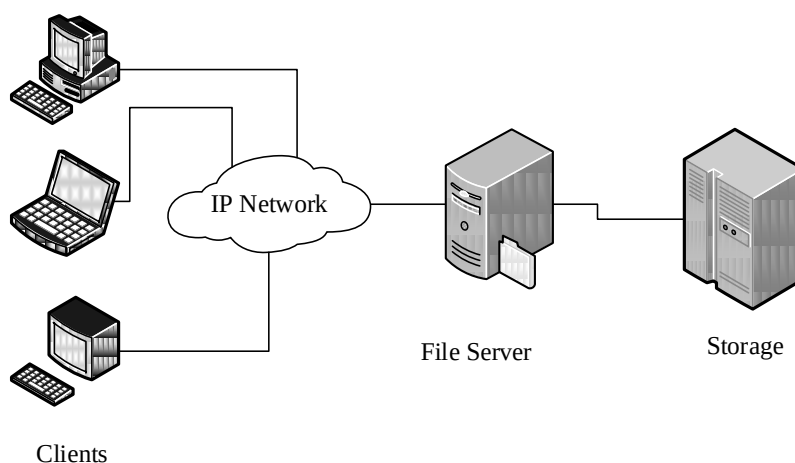


Рис.5 – Структура СХД файлового типа

Существует два типа вертикально масштабируемых систем NAS – интегрированные NAS и шлюзовые NAS. Интегрированная система объединяет в одной системе одну или несколько головных частей NAS и систему хранения. Головные части NAS подключены к системе хранения. Система хранения может состоять из дисков различных типов, например, дисков SAS, ATA, Fibre Channel и твердотельных дисков (SSD), чтобы соответствовать требованиям различных рабочих нагрузок. Каждая головная часть NAS в интегрированной системе NAS имеет внешние порты Ethernet, которые подключаются к IP-сети. Внешние порты предоставляют возможности подключения к клиентам. Каждая головная часть NAS имеет внутренние порты, дающие возможность подключения к подсоединенной системе хранения. В интегрированных системах NAS установлено программное обеспечение для управления NAS, которое можно использовать для выполнения всех административных задач для головной части NAS и ресурсов хранения.

Шлюзовая система NAS состоит из одной или нескольких головных частей NAS и использует внешние и независимо управляемые ресурсы хранения. В реализации шлюзовой системы NAS NAS-шлюз совместно использует ресурсы хранения блочной системы хранения. Функции управления в решении этого типа отличаются большей сложностью по сравнению со

средой интегрированной NAS, поскольку административные задачи для головной части NAS и для системы хранения в нем разделены. Административные задачи NAS-шлюза выполняются программным обеспечением для управления NAS, а системой хранения управляет программное обеспечение для управления блочной системой хранения. Шлюзовое решение может использовать инфраструктуру Fibre Channel (например, коммутаторы и директоры) для получения доступа к массивам системы хранения, подключенной к сети хранения данных или непосредственно к серверу.

Объектная система хранения. Объектное устройство хранения (OSD) хранит данные в виде объектов в одноуровневом адресном пространстве на основе их содержания и других атрибутов, а не имени и расположения. Объект – это базовый элемент объектной системы хранения, который может содержать пользовательские данные, связанные метаданные (размер, дата, владелец и т. п.) и другие определенные пользователем атрибуты данных (хранение, схема доступа и др.).

Файловые системы хранения основываются на иерархиях файлов со сложной структурой. Большинство файловых систем поддерживают ограниченное количество файлов, каталогов и уровней иерархии. В свою очередь, это ограничивает объем данных, которые можно хранить в таких системах. Устройство OSD хранит данные, используя одноуровневое пространство имен, в котором объекты существуют на одном уровне и не могут помещаться в другие объекты. Таким образом, отсутствует иерархия каталогов и файлов; как результат, можно сохранять значительно большее количество объектов в едином пространстве имен.

Далее рассмотрим более подробно процессы обработки данных для блочных структур хранения.

Контроллер блочной системы хранения состоит из трех ключевых компонентов: клиентский интерфейс, кэш-память и серверная часть. Запрос ввода-вывода передается из вычислительной системы через внешний порт и обрабатывается с помощью кэш-памяти и серверной части. Это позволяет хранить данные в СХД и извлекать их из нее. Запрос чтения может обслуживаться непосредственно из кэш-памяти, если в ней обнаружены запрошенные данные. В современных системах хранения клиентский интерфейс, кэш-память и серверная часть обычно интегрированы в единую панель (которую называют процессором СХД или контроллером системы хранения данных).

Клиентский интерфейс обеспечивает обмен данными между системой хранения и вычислительной системой. Он состоит из двух компонентов: внешних портов и внешних контроллеров. Обычно клиентский интерфейс имеет резервные контроллеры для обеспечения высокой доступности, а каждый контроллер содержит несколько портов, которые позволяют подключать множество вычислительных систем к интеллектуальной системе хранения данных. Каждый внешний контроллер имеет логику обработки, которая

обеспечивает использование соответствующего транспортного протокола, например Fibre Channel, iSCSI, или FCoE для подключения к СХД.

Внешние контроллеры направляют данные в кэш-память и из нее посредством внутренней шины данных. Когда кэш-память получает данные записи, контроллер отправляет сообщение с подтверждением в вычислительную систему.

Кэш-память — это полупроводниковая память, в которую временно помещаются данные, чтобы сократить время, необходимое для обслуживания запросов ввода-вывода из вычислительной системы. Кэш-память улучшает производительность системы, изолируя вычислительные системы от СХД (жестких и твердотельных дисков).

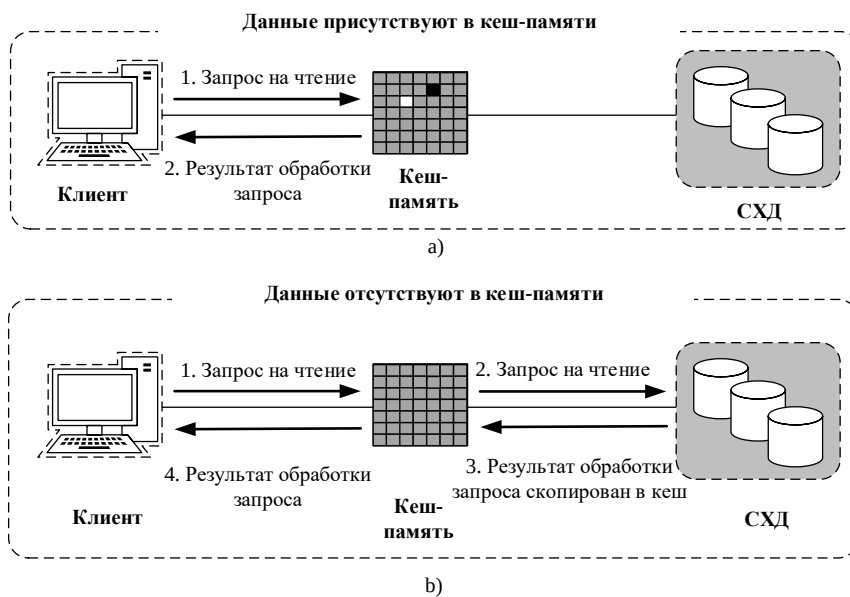


Рис.6 – Операции чтения с использованием кэш-памяти

Когда вычислительная система посылает запрос чтения, контроллер системы хранения данных считывает метку ОЗУ, чтобы определить доступность необходимых данных в кэш-памяти. Если запрошенные данные обнаружены в кэш-памяти, это называется *попаданием в кэше считывания* или *попаданием при чтении*, а данные отправляются непосредственно в вычислительную систему без выполнения операций во внутреннем хранилище. Это обеспечивает для вычислительной системы малое время отклика (около миллисекунды). Если запрошенные данные не обнаружены в кэш-памяти, то это называется *промахом кэш-памяти*. В этой ситуации данные должны быть считаны из системы хранения. Серверная часть получает доступ к соответствующему устройству хранения данных и извлекает запрошенные данные. Данные помещаются в кэш-память, а затем отправляются в вычислительную систему с помощью клиентского интерфейса. Промахи кэш-памяти увеличивают время отклика при выполнении операций ввода-вывода.

Алгоритм предварительной выборки или упреждающего чтения используется, когда применяются последовательные запросы на чтение. При

последовательном запросе на чтение извлекается смежный набор связанных блоков. Несколько других блоков, которые еще не запросила вычислительная система, могут быть считаны из системы хранения и помещены в кэш-память заранее. Когда вычислительная система впоследствии запросит эти блоки, то операции чтения будут попаданиями при чтении. Этот процесс значительно сокращает время отклика для вычислительной системы.

Интеллектуальная система хранения предлагает фиксированный и изменяющийся размеры предварительной выборки. При использовании предварительной выборки фиксированного размера интеллектуальная система хранения устанавливает предварительную выборку с фиксированным объемом данных. Такую выборку целесообразно использовать при одинаковых размерах блоков ввода-вывода вычислительной системы. При использовании предварительной выборки с изменяющимся размером система хранения предварительно выбирает различные объемы данных по запросу вычислительной системы. Максимальный размер предварительной выборки ограничивает количество блоков данных, которые можно предварительно извлечь, что позволяет избежать загрузки СХД операциями предварительной выборки за счет других операций ввода-вывода.

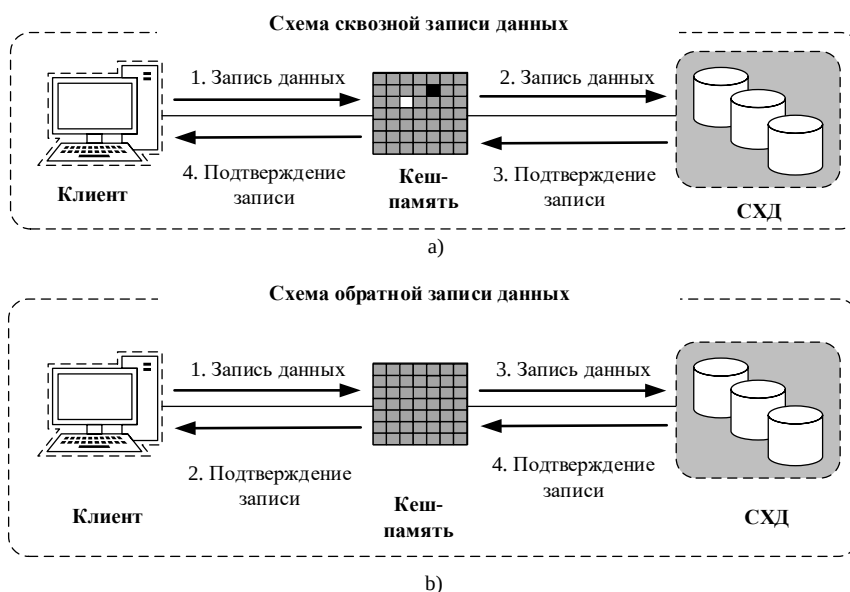


Рис.7 – Операции записи с использованием кэш-памяти

Производительность чтения измеряется *коэффициентом попаданий операций чтения* или *частотой попаданий*, которая обычно выражается в процентах. Этот коэффициент представляет собой отношение числа попаданий при чтении к общему числу запросов на чтение. Чем выше коэффициент попаданий операций чтения, тем выше производительность этих операций.

Операции записи с кэш-памятью обеспечивают преимущества в производительности посредством прямой записи в систему хранения. Когда операция записана в кэш-память и подтверждена, она выполняется быстрее (для вычислительной системы), чем это происходит в том случае, когда

операция записывается прямо в систему хранения. Последовательная запись также предлагает возможности для оптимизации, поскольку несколько небольших операций записи можно объединить для передачи в систему хранения с помощью кэш-памяти. Для выполнения операций записи с использованием кэш-памяти используются следующие методы.

Кэширование со сквозной записью. Данные помещаются в кэш-память и незамедлительно записываются в систему хранения, а в вычислительную систему отправляется подтверждение. Данные отправляются в систему хранения немедленно, поэтому риск их потери низкий. Однако время отклика операций записи увеличивается из-за операций, выполняемых системой хранения.

Кэширование с обратной записью. Данные помещаются в кэш-память, а подтверждение отправляется в вычислительную систему мгновенно. Позже данные нескольких операций записи направляются (переносятся с удалением) в систему хранения. Отклик для операций записи происходит намного более оперативно, поскольку операции записи изолированы от устройств хранения данных. Однако переданные данные могут быть утрачены, если произойдет сбой кэш-памяти.

Кэш-память можно обойти при определенных условиях, например, если операции ввода-вывода выполняются с большими объемами данных. В этом случае, если объем запроса ввода-вывода превышает предустановленный размер (*размер обособленной операции записи*), то записанные данные напрямую отправляются в систему хранения, чтобы снизить нагрузку на кэш-память, вызванную использованием больших объемов данных. Это особенно полезно в средах, где ресурсы кэш-памяти ограничены, а сама кэш-память используется для произвольных операций чтения и записи малого объема.

Серверная часть обеспечивает взаимодействие между кэш-памятью и физическими дисками СХД. Она состоит из двух компонентов: внутренних портов и контроллеров серверной части. Серверная часть контролирует обмен данными между кэш-памятью и физическими дисками. Данные отправляются из кэш-памяти в серверную часть, а затем передаются на целевые диски СХД. Физические диски подключаются к портам серверной части. Внутренний контроллер обменивается данными с дисками СХД в процессе выполнения операций чтения и записи, а также предоставляет дополнительное (но ограниченное в объеме) временное хранилище для данных. Алгоритмы, выполняемые для контроллеров серверной части, обеспечивают поиск и исправление ошибок, а также функциональность массивов RAID.

Физические диски СХД подключены к контроллеру СХД серверной части и обеспечивают возможность хранения данных на постоянной основе. Современные интеллектуальные системы хранения поддерживают множество дисков СХД различных типов, работающих с разными скоростями, например, Fibre Channel, SATA, SAS и твердотельные диски (SSD).

В данной работе рассматривается блочная система облачного хранения данных общего вида с кэш-памятью.

Целью данной работы является определение функции распределения (ФР) времени отклика блочной системы облачного хранения данных на запрос записи данных.

Постановка задачи.

Поставим задачу следующим образом: пусть известны ФР $F_1(t)$, $G_1(t)$ и $R_1(t)$ случайных величин (СВ) α_1 , γ_1 и β_1 , которые являются временами обработки запросов на запись от пользователя к кэш-памяти, от кэш-памяти к серверу хранения данных (СеХД) и само время записи в кэш-память соответственно, а также ФР $F_2(t)$, $G_2(t)$ и $R_2(t)$ случайных величин α_2 , γ_2 и β_2 – времен между сбоями в каналах связи между пользователем и модулями памяти, между кэш-памятью и СеХД и сбоями записи в кэш-память. Кроме этого известна вероятность p необходимости сохранения требуемой информации в модулях памяти СеХД.

При построении модели принимается допущение о том, что при возникновении сбоя в канале передачи данных выполнение пользовательского запроса на запись данных начинается сначала.

В проводимом исследовании необходимо определить функцию распределения времени полной обработки запроса на запись указанной системой.

Построение модели.

Функционирование системы опишем полумарковским процессом (ПМП) $\xi(t)$ с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний [13 – 19]. Введем следующее множество E полумарковских состояний системы:

$$E = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}.$$

Расшифруем содержательный смысл кодов состояний:

S_0 – запрос выполнен (мгновенное состояние);

S_1 – запрос от пользователя получен (или в момент выполнения запроса произошел сбой в канале передачи данных), началось повторное выполнение запроса;

S_2 – производится запись данных в модули кэш-памяти;

S_3 – производится запись данных на СеХД (или во время выполнения записи произошел сбой в канале передачи данных), выполнение запроса на запись данных началось с начала.

Граф состояний системы представлен на рисунке 8.

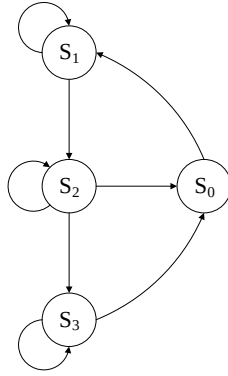


Рис.8 – граф состояний системы

Времена пребывания $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ системы в состояниях S_0, S_1, S_2 и S_3 равны $\theta_0 = 0; \theta_1 = (\alpha_1 \wedge \alpha_2); \theta_2 = (\beta_1 \wedge \beta_2); \theta_3 = (\gamma_1 \wedge \gamma_2)$,

где $\wedge$ – знак, обозначающий минимум случайных величин.

Тогда ФР времен пребывания системы в состояниях равны:

$$F_{S0}(t) = 0; \bar{F}_{S1}(t) = \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_2(t); F_{S2}(t) = \bar{R}_1(t) \cdot \bar{R}_2(t); \bar{F}_{S3}(t) = \bar{G}_1(t) \cdot \bar{G}_2(t).$$

Опишем вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0^1 = 1; \\ P_1^1 \{ \alpha_1 > \alpha_2 \} = \int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_2(t) dt; \\ P_1^2 \{ \alpha_1 < \alpha_2 \} = \int_0^{\infty} f_1(t) \bar{F}_2(t) dt; \\ P_2^0 = p \cdot \int_0^{\infty} r_1(t) \bar{R}_2(t) dt; \\ P_2^2 = \int_0^{\infty} \bar{R}_1(t) r_2(t) dt; \\ P_2^3 = (1 - p) \cdot \int_0^{\infty} r_1(t) \bar{R}_2(t) dt; \\ P_3^3 = \int_0^{\infty} \bar{G}_1(t) g_2(t) dt; \\ P_3^0 = \int_0^{\infty} g_1(t) \bar{G}_2(t) dt. \end{array} \right. \quad (1)$$

Используя систему (1), запишем систему уравнений для определения стационарного распределения вложенной цепи Маркова $\rho(x)$ [15, 16, 19]:

$$\begin{cases} \rho_0 = \rho_2 \cdot P_2^0 + \rho_3 \cdot P_3^0, \\ \rho_1 = \rho_0 \cdot P_0^1 + \rho_1 \cdot P_1^1, \\ \rho_2 = \rho_1 \cdot P_1^2 + \rho_2 \cdot P_2^2, \\ \rho_3 = \rho_2 \cdot P_2^3 + \rho_3 \cdot P_3^3. \end{cases} \quad (2)$$

Условие нормировки:

$$\rho_0 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = 1. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (2) с использованием условия (3), получим:

$$\begin{cases} \rho_0 = \frac{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0}{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0 + P_2^3 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_2^3}; \\ \rho_1 = \frac{P_2^3 \cdot P_3^0}{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0 + P_2^3 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_2^3}; \\ \rho_2 = \frac{P_1^2 \cdot P_3^0}{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0 + P_2^3 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_2^3}; \\ \rho_3 = \frac{P_1^2 \cdot P_2^3}{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0 + P_2^3 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_2^3}. \end{cases}$$

Представим множество всех состояний в виде: $E = E_+ \cup E_-$, $E_+ = \{S_1, S_2, S_3\}$, $E_- = \{S_0\}$. Подмножество состояний E_+ описывает процесс обслуживания запроса на запись данных.

Определим полумарковские ядра $Q(t, x, B)$ процесса марковского восстановления (ПМВ) $\{\xi_n, \theta_n, n \geq 0\}$:

$$\begin{cases} Q(t, S_0, S_1) = 1; \\ Q(t, S_1, S_1) = P\{\xi_{n+1} = S_1; \theta_{n+1} \leq t / \xi_n = S_1\} = P\{\alpha_1 > \alpha_2; \alpha_2 < t\} = \int_0^t \bar{F}_1(x) f_2(x) dx; \\ Q(t, S_1, S_2) = P\{\xi_{n+1} = S_2; \theta_{n+1} \leq t / \xi_n = S_1\} = P\{\alpha_1 < \alpha_2; \alpha_1 < t\} = \int_0^t f_1(x) \bar{F}_2(x) dx; \\ Q(t, S_2, S_0) = P\{\xi_{n+1} = S_0; \theta_{n+1} \leq t / \xi_n = S_2\} = \\ = P\{\beta_1 < \beta_2; \beta_1 < t\} \cdot p = p \cdot \int_0^\infty r_1(t) \bar{R}_2(t) dt; \\ Q(t, S_2, S_2) = P\{\xi_{n+1} = S_0; \theta_{n+1} \leq t / \xi_n = S_2\} = P\{\beta_1 > \beta_2; \beta_2 < t\} = \int_0^t \bar{R}_1(t) r_2(t) dt; \\ Q(t, S_2, S_3) = P\{\xi_{n+1} = S_3; \theta_{n+1} \leq t / \xi_n = S_2\} = \\ = P\{\beta_1 < \beta_2; \beta_1 < t\} \cdot (1 - p) = (1 - p) \cdot \int_0^\infty r_1(t) \bar{R}_2(t) dt; \\ Q(t, S_3, S_3) = P\{\xi_{n+1} = S_3; \theta_{n+1} \leq t / \xi_n = S_3\} = P\{\gamma_1 > \gamma_2; \gamma_2 < t\} = \int_0^t \bar{G}_1(x) g_2(x) dx; \\ Q(t, S_3, S_0) = P\{\xi_{n+1} = S_0; \theta_{n+1} \leq t / \xi_n = S_3\} = P\{\gamma_1 < \gamma_2; \gamma_1 < t\} = \int_0^t g_1(x) \bar{G}_2(x) dx. \end{cases} \quad (4)$$

Найдем распределение времени пребывания полумарковского процесса (ПМП) $\xi(t)$ в подмножестве состояний E_+ . Пусть τ_1, τ_2, τ_3 – времена пребывания ПМП $\xi(t)$ в E_+ с начальными состояниями S_1, S_2, S_3 соответственно; $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \varphi_3(t)$ – соответствующие этим временам ФР.

Составим уравнения марковского восстановления (УМВ) [16, 17] для подмножества E_+ :

$$\begin{cases} \varphi_1(t) = \int_0^t Q(dx, S_1, S_1)\varphi_1(t-x) + \int_0^t Q(dx, S_1, S_2)\varphi_2(t-x); \\ \varphi_2(t) = \int_0^t Q(dx, S_2, S_2)\varphi_2(t-x) + \int_0^t Q(dx, S_2, S_3)\varphi_3(t-x) + Q(t, S_2, S_0); \\ \varphi_3(t) = \int_0^t Q(dx, S_3, S_3)\varphi_3(t-x) + Q(t, S_3, S_0). \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя выражения (4) в (5), имеем:

$$\begin{cases} \varphi_1(t) = \int_0^t \varphi_1(t-x)\bar{F}_1(x)f_2(x)dx + \int_0^t \varphi_2(t-x)f_1(x)\bar{F}_2(x)dx; \\ \varphi_2(t) = \int_0^t \varphi_2(t-x)\bar{R}_1(x)r_2(x)dx + (1-p) \cdot \int_0^t \varphi_3(t-x)r_1(x)\bar{R}_2(x)dx + \\ + p \cdot \int_0^t r_1(x)\bar{R}_2(x)dx; \\ \varphi_3(t) = \int_0^t \varphi_3(t-x)\bar{G}_1(x)g_2(x)dx + \int_0^t g_1(x)\bar{G}_2(x)dx. \end{cases} \quad (6)$$

Произведя в (6) замену переменной получим:

$$\begin{cases} \varphi_1(t) = \int_0^t \varphi_1(x)\bar{F}_1(t-x)f_2(t-x)dx + \int_0^t \varphi_2(x)f_1(t-x)\bar{F}_2(t-x)dx; \\ \varphi_2(t) = \int_0^t \varphi_2(x)\bar{R}_1(t-x)r_2(t-x)dx + (1-p) \cdot \int_0^t \varphi_3(x)r_1(t-x)\bar{R}_2(t-x)dx + \\ + p \cdot \int_0^t r_1(x)\bar{R}_2(x)dx; \\ \varphi_3(t) = \int_0^t \varphi_3(x)\bar{G}_1(t-x)g_2(t-x)dx + \int_0^t g_1(x)\bar{G}_2(x)dx. \end{cases} \quad (7)$$

Представим третье уравнение системы (7) в виде:

$$\varphi_3(t) = \int_0^t \varphi_3(x) K_3(t-x) dx + \Phi_3(t), \quad (8)$$

где $K_3(x) = \bar{G}_1(x)g_2(x)$, $\Phi_3(x) = \int_0^t g_1(x)\bar{G}_2(x)dx$.

Введем оператор $[A\varphi_3](t)$ [20, 21]:

$$[A\varphi_3](t) = \int_0^t \varphi_3(x) K_3(t-x) dx.$$

Выражение (8) примет вид:

$$\varphi_3(t) = [A\varphi_3](t) + \Phi_3(t). \quad (9)$$

Решая (9), получим:

$$\varphi_3(t) = [I - A]\Phi_3(t) = \Phi_3(t) + \sum_{n=1}^{\infty} [A^n \Phi_3](t),$$

где I – единичный (тождественный) оператор.

Тогда

$$\varphi_3(t) = \Phi_3(t) + \int_0^t h_3(t-x)\Phi_3(x)dx, \quad (10)$$

где $h_3(x) = \sum_{n=1}^{\infty} [\bar{G}_1 \cdot g_2]^{(*)n}(x)$; $\Phi_3(x) = \int_0^t g_1(x)\bar{G}_2(x)dx$.

Подставив $\varphi_3(x)$ в (10), получим:

$$\varphi_3(t) = \int_0^t g_1(x)\bar{G}_2(x)dx + \int_0^t h_3(t-x) \int_0^x g_1(y)\bar{G}_2(y)dydx.$$

Представим второе уравнение системы (7) в виде:

$$\varphi_2(t) = \int_0^t \varphi_2(x) K_2(t-x) dx + \Phi_2(t), \quad (11)$$

где $K_2(x) = \bar{R}_1(x)r_2(x)$,

$$\Phi_2(x) = (1-p) \cdot \int_0^t \varphi_3(x)r_1(t-x)\bar{R}_2(t-x)dx + p \cdot \int_0^t r_1(x)\bar{R}_2(x)dx.$$

Введем оператор $[A\varphi_2](t)$ [20, 21]:

$$[A\varphi_2](t) = \int_0^t \varphi_2(x) K_2(t-x) dx.$$

Выражение (11) примет вид:

$$\varphi_2(t) = [A\varphi_2](t) + \Phi_2(t). \quad (12)$$

Решая (12), получим:

$$\varphi_2(t) = [I - A]\Phi_2(t) = \Phi_2(t) + \sum_{n=1}^{\infty} [A^n \Phi_2](t),$$

где I – единичный (тождественный) оператор.

Тогда

$$\varphi_2(t) = \Phi_2(t) + \int_0^t h_2(t-x) \Phi_2(x) dx,$$

где $h_2(x) = \sum_{n=1}^{\infty} [\bar{G}_1 \cdot g_2]^{(*)n}(x)$;

$$\Phi_2(x) = (1-p) \cdot \int_0^t \varphi_3(x) r_1(t-x) \bar{R}_2(t-x) dx + p \cdot \int_0^t r_1(x) \bar{R}_2(x) dx.$$

Представим первое уравнение системы (7) в виде:

$$\varphi_1(t) = \int_0^t \varphi_1(x) K_1(t-x) dx + \Phi_1(x), \quad (13)$$

где $K_1(x) = \bar{F}_1(x) f_2(x)$, $\Phi_1(x) = \int_0^x \varphi_2(y) f_1(x-y) \bar{F}_2(x-y) dy$;

Введем оператор [20, 21]:

$$[A\varphi_1](t) = \int_0^t \varphi_1(x) K_1(t-x) dx.$$

Выражение (13) примет вид:

$$\varphi_1(t) = [A\varphi_1](t) + \Phi_1(t). \quad (14)$$

Решая (14), получим:

$$\varphi_1(t) = [I - A]\Phi_1(t) = \Phi_1(t) + \sum_{n=1}^{\infty} [A^n \Phi_1](t).$$

Проинтегрировав, получим

$$\varphi_1(t) = \Phi_1(t) + \int_0^t h_1(t-x)\Phi_1(x)dx, \quad (15)$$

где $h_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} [\bar{F}_1 \cdot f_2]^{(*)n}(x)$; $\Phi_1(x) = \int_0^x \varphi_2(y) f_1(x-y) \bar{F}_2(x-y) dy$;

Подставив $\Phi_1(x)$ в (15), получим:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) = & \int_0^t \varphi_2(y) f_1(t-y) \bar{F}_2(t-y) dy + \\ & + \int_0^t h_1(t-x) \int_0^x \varphi_2(y) f_1(x-y) \bar{F}_2(x-y) dy dx. \end{aligned} \quad (16)$$

Полученная ФР (16) описывает полное время обработки запроса на чтение системой.

Результаты моделирования по формуле (16) представлены на рисунке 9.

Исходными данными для моделирования служат, ФР $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$, $R_1(t)$ и $R_2(t)$, которые соответствуют обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами λ_1, λ_2 ; μ_1, μ_2 ; ν_1, ν_2 ; τ_1, τ_2 ; ω_1, ω_2 соответственно. При этом:

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

где $\lambda_1 = 1,101$ (c^{-1}); $\lambda_2 = 10,899$ (c^{-1});

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

где $\mu_1 = 0,0688$ (c^{-1}); $\mu_2 = 0,681$ (c^{-1});

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

где $\nu_1 = 1,101$ (c^{-1}); $\nu_2 = 10,899$ (c^{-1});

$$g_2(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1},$$

где $\nu_1 = 0,0688$ (c^{-1}); $\nu_2 = 0,681$ (c^{-1});

$$r_1(t) = \frac{\tau_1 \tau_2 (e^{-\tau_1 t} - e^{-\tau_2 t})}{\tau_2 - \tau_1},$$

где $\tau_1 = 11,01 \text{ (с}^{-1}\text{)}$; $\tau_2 = 108,99 \text{ (с}^{-1}\text{)}$.

$$r_2(t) = \frac{\omega_1 \omega_2 (e^{-\omega_1 t} - e^{-\omega_2 t})}{\omega_2 - \omega_1},$$

где $\omega_1 = 11,01 \text{ (с}^{-1}\text{)}$; $\omega_2 = 108,99 \text{ (с}^{-1}\text{)}$.

А также вероятность нахождения данных в кэш-памяти системы $p = 0.4$.

Сравним значения математического ожидания полученной нами функции (4) и математического ожидания, определяемого с помощью выражения [16]:

$$T_+ = \frac{\sum_{i \in M_+} m_i \rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_i}. \quad (17)$$

Математическое ожидание полученной нами функции распределения составляет 1,7037037 с.,

тогда как определяемое по формуле (17) – 1,7037037 с.

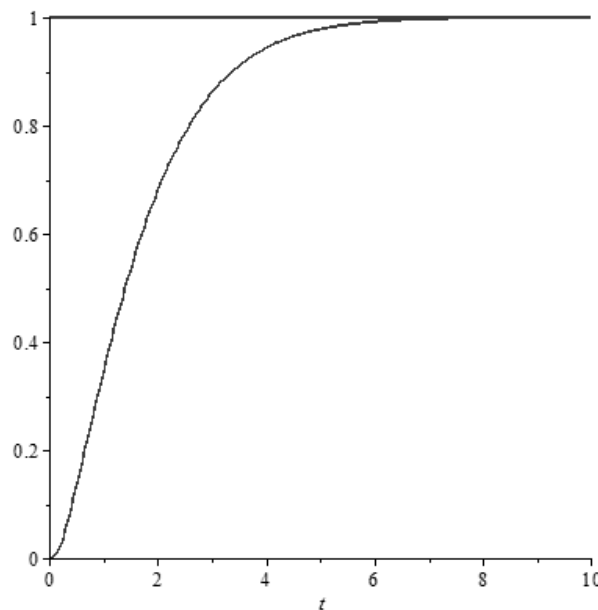


Рис.9 – Вид ФР полного времени обработки запроса на чтение

Выводы. Проведенное сравнение значений математического ожидания времени полной обработки запроса на запись данных к системе хранения данных, определенного с использованием полученной нами функции распределения, и полученного по формуле, приведенной в работе [16], показало полное совпадение результатов.

Полученные результаты позволяют определять время ответа на запрос записи данных системой облачного хранения данных, что позволяет оценить влияние быстродействия информационной системы на адаптивность технологического процесса и, если необходимо, принять решение о повышении быстродействия системы. Полученная в результате моделирования функция распределения позволяет использовать данную модель при построении моделей более сложных иерархически подчиненных информационных и производственных систем.

В дальнейших исследованиях планируется провести моделирование других информационных систем, описанных в приведенной выше классификации.

Исследования выполнены при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 15-01-05840, № 15-29-07936.

Библиографический список

- 1.Кириянова А. Россия создает 2,4% мирового объема данных // Издание о высоких технологиях CNews. Главные новости. URL: www.cnews.ru/news/top/rossiya_sozdaet_24_mirovogo_obema_dannyh (дата обращения: 08.08.2017).
- 2.Клименков П.А., Кузнецов С.Д. Большие данные: современные подходы к хранению и обработке // Труды ИСП РАН. 2012. №22. С. 143–158.
- 3.Хашковский В.В., Шкурко А. Н. Современные подходы в организации систем обработки больших объемов данных // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №8. С. 241–250.
- 4.Соболь А. С. Обработка больших данных в телекоммуникационных компаниях // Вестник СибГУ им. М.Ф. Решетнева. 2014. №2 (54). С. 73–76.
- 5.Ганин Д.В., Климов Р.В. Особенности моделирования надежности распределенных систем хранения данных // Вестник НГИЭИ. 2017. №7 (74). С. 18–25.
- 6.Tormasov A., Lysov A., Mazur E. Distributed data storage systems: analysis, classification and choice // Труды ИСП РАН. 2015. №6. С. 225–252.
- 7.От хранения данных к управлению информацией. 2-е изд. // СПб.: Питер. 2016. 544 с.
- 8.Зенченко Е.С. Сравнительный анализ систем хранения данных // Cloud of science. 2013. №3. С.22–26.
- 9.Проскуряков Н.Е., Ануфриева А.Ю. Анализ и перспективы современных систем хранения цифровых данных // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №3. С. 368–377.
- 10.Быков В. В. Проблемы хранения медиаинформации // T-Comm. 2011. №9. С. 39–41.
- 11.Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оценка надежности отказоустойчивых кластеров с непосредственным подключением устройств хранения // Приборостроение. 2013. №8. С. 77–81.
- 12.Соловьев Д., Иртегов Д.В., Рутман М.В., Маллаева Ю.М., Князев И.С. Гибридное двухуровневое сетевое файловое хранилище и его применение в

облачном хостинге // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2014. №4. С. 96–101.

13. Obzherin Yu.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. USA, Elsevier, Academic Press, 2015. 214 p.

14. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.

15. Королук В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.

16. Королук В.С. Стохастические модели систем. Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: Наукова думка, 1989. 208 с.

17. Королук В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления / В.С. Королук // – Кибернетика. – 1981. №4. – С. 121 – 124.

18. Королук В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королук, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1976. – 181 с.

19. Броди С.М., Власенко О.Н., Марченко Б.Г. Расчет и планирование испытаний систем на надежность. Киев: Наукова думка, 1970. 192 с.

20. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. Учебник для ун-тов. 6-е изд., испр. М.: Наука, 1989. 623 с.

21. Михлин С.Г. Интегральные уравнения и их приложения к некоторым проблемам механики, математической физики и техники. М.: Гостехиздат, 1949. 380 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Kiryanova A. Rossiya sozdaet 2,4% mirovogo ob'ema dannyih // Izdanie o vyisokih tehnologiyah CNews. Glavnyie novosti. URL: www.cnews.ru/news/top/rossiya_sozdaet_24_mirovogo_obema_dannyh (data obrascheniya: 08.08.2017).

2. Klimenkov P.A., Kuznetsov S.D. Bolshie dannyie: sovremennyye podhody k hraneniyu i obrabotke // Trudy ISP RAN. 2012. #22. S. 143–158.

3. Hashkovskiy V.V., Shkurko A. N. Sovremennyye podhody v organizatsii sistem obrabotki bolshih ob'emov dannyih // Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki. 2014. #8. S. 241–250.

4. Sobol A. S. Obrabotka bolshih dannyih v telekommunikatsionnykh kompaniyah // Vestnik SibGU im. M.F. Reshetneva. 2014. #2 (54). S. 73–76.

5. Ganin D.V., Klimov R.V. Osobennosti modelirovaniya nadezhnosti raspredelennykh sistem hraneniya dannyih // Vestnik NGIEI. 2017. #7 (74). S. 18–25.

6. Tormasov A., Lysov A., Mazur E. Distributed data storage systems: analysis, classification and choice // Trudy ISP RAN. 2015. #6. S. 225–252.

7. Ot hraneniya dannyih k upravleniyu informatsiey. 2-e izd. // SPb.: Piter. 2016. 544 s.

8. Zenchenko E.S. Sravnitelnyy analiz sistem hraneniya dannyih // Cloud of science. 2013. #3. S.22–26.

9. Proskuryakov N.E., Anufrieva A.Yu. Analiz i perspektivyi sovremennyih sistem hraneniya tsifrovyyh dannyyh // Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki. 2013. #3. S. 368–377.
10. Byikov V. V. Problemyi hraneniya mediainformatsii // T-Comm. 2011. #9. S. 39–41.
11. Bogatyirev V.A., Bogatyirev S.V., Bogatyirev A.V. Otsenka nadezhnosti otkazoustoychivyyh klasterov s neposredstvennyim podklyucheniem ustroystv hraneniya // Priborostroenie. 2013. #8. S. 77–81.
12. Solovev D., Irtegov D.V., Rutman M.V., Mallaeva Yu.M., Knyazev I.S. Gibridnoe dvuhurovnevoe setevoe faylovoe hranilische i ego primeneniye v oblachnom hostinge // Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnyie tehnologii. 2014. #4. S. 96–101.
13. Obzherin Yu.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. USA, Elsevier, Academic Press, 2015. 214 p.
14. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.
15. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Protsessyi markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem. Kiev: Naukova dumka, 1982. 236 s.
16. Korolyuk V.S. Stokhasticheskie modeli sistem. Otv. red. A.F. Turbin. Kiev: Naukova dumka, 1989. 208 s.
17. Korolyuk V.S. Superpozitsiya protsessov markovskogo vosstanovleniya / V.S. Korolyuk // – Kibernetika. – 1981. #4. – S. 121 – 124.
18. Korolyuk V.S. Polumarkovskie protsessyi i ih prilozheniya / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: Nauk. Dumka, 1976. – 181 s.
19. Brodi S.M., Vlasenko O.N., Marchenko B.G. Raschet i planirovaniye ispytaniy sistem na nadezhnost. Kiev: Naukova dumka, 1970. 192 s.
20. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. Elementyi teorii funktsiy i funktsionalnogo analiza. Uchebnik dlya un-tov. 6-e izd., ispr. M.: Nauka, 1989. 623 s.
21. Mihlin S.G. Integralnyie uravneniya i ih prilozheniya k nekotoryim problemam mehaniki, matematicheskoy fiziki i tehniki. M.: Gostehizdat, 1949. 380 s.

Копп Вадим Яковлевич, д-р техн. наук, проф., v_kopp@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доцент, zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-48-920014.

MODELING OF CLOUD STORAGE SYSTEM WITH CASH MEMORY

Kopp V.YA., Zamoryonov M.V., Shevchenko V.I.

The article provides a classification of data storage systems, allowing to specify the field of study. When using the semi-Markov process apparatus, a mathematical model is developed for processing requests for writing data to the cloud storage system with cache memory. In the process of constructing the semi-Markov model, the distribution function of a random variable was obtained — the time of complete processing of the request for recording data. For this, a solution was obtained for the system of Markov recovery equations, which is a system of Volterra integral equations of the 2nd kind with a semi-stochastic core. The system was solved by the operator method. A comparison was made of the mathematical expectation of the complete processing of the request for recording data obtained as a result of modeling and the mathematical expectation obtained by the theorem on the average stationary time of a semi-Markov process in a subset of states, for which the stationary distribution of the nested Markov chain was determined.

Keywords: semi-Markov process, mathematical model, cloud storage system, mathematical expectation.

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОБЕСЦЕНИВАЮЩИХ ОТКАЗОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ПОЛУМАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ

Рапацкий Ю.Л.¹, Заморенов М.В.², Копп В.Я.³, Обжерин Ю.Е.⁴, Липка В.М.⁵

Аннотация. Рассматривается влияние необесценивающих отказов на производительность и надежность технологических процессов автоматизированного механосборочного производства. Предлагаемая полумарковская модель позволяет исследовать, в частности, технологические процессы изготовления деталей с резьбой и сборки резьбовых соединений. Основным аппаратом исследования является теория полумарковских процессов с общим фазовым пространством, оперирующая с общего вида функциями распределения случайных величин. В построенной модели определяются не только моментные характеристики, но и функция распределения времени обслуживания единицы продукции с учетом необесценивающих отказов, на основе решения уравнений марковского восстановления. Последнее особенно важно, если рассматриваемый технологический процесс входит подсистемой в другую систему, находящуюся на более высоком уровне иерархии, так как для стыковки моделей иерархических уровней друг с другом в качестве выходной информации моделей требуются именно функции распределения.

Ключевые слова. полумарковская модель, резьбовое соединение, надежность, производительность технологического процесса, автоматизированная сборка, различные виды отказов

Создание конкурентоспособной продукции в машиностроении и других производственных отраслях в настоящее время невозможно без комплексного анализа взаимосвязи этапов её жизненного цикла. Моделирование технологических процессов является эффективным инструментом, необходимым при проектировании и модернизации автоматизированных производственных систем, для оценки параметров их функционирования. Автоматизированное механосборочное производство является основной формой организации современного машиностроения, в т.ч. автомобильной промышленности, станкостроения и других отраслей. Рассмотрим подробнее построение полумарковских моделей технологических процессов механосборочного производства, позволяющих определить производительность функционирования обслуживающих устройств с учетом надежности. В качестве обслуживающих устройств будем рассматривать различные производственные, контрольные, информационно – вычислительные модули, в т.ч. технологические ячейки, на основании моделей которых создается модель производственной или информационной системы в целом. Во многих случаях важно определить наиболее полную характеристику производительности – время цикла обслуживания единицы продукции. При этом необходимо учитывать стохастический характер и времени обслуживания, и времён наработки на отказ и восстановления. Этим вопросам посвящен ряд работ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Моделированию и исследованию современного механосборочного

производства посвящена статья [8], поставленные в ней проблемы требуют более подробного изучения. Резьбовые соединения М6-М20 с шагом 1,0...2,5 мм составляют более 50% от всех применяемых в изделиях машиностроения средств соединения деталей [9, 10]. Наряду с другими видами крепежных деталей, болты и шпильки с метрическими резьбами применяются при автоматизированной и ручной сборке изделий машиностроения, а также в процессе их эксплуатации, обслуживания и ремонта. Модернизация и реновация различного технологического оборудования, судовых машин и механизмов, подвижного состава железнодорожного и автомобильного транспорта невозможна без применения резьбовых деталей и технических средств сборки резьбовых соединений. Нераскрытие стыка при эксплуатации является основным критерием качества резьбовых соединений, которое в значительной мере определяет надежность изделий машиностроения [9, 10].

Цель исследования: построение общей полумарковской модели, позволяющей исследовать производительность и надежность различных технологических процессов механосборочного производства, в том числе изготовления деталей с резьбой и автоматизированной сборки резьбовых соединений, с учетом необесценивающих отказов и технологической наследственности.

Основная часть. Наиболее эффективным способом получения крепежных резьбовых деталей с наружной резьбой в серийном и массовом производстве является накатывание роликами на двухроликовых станках с радиальной подачей [8, 9, 10, 11, 12]. Вместе с тем, как показали эксперименты [9, 10, 11], обеспечение стабильного качества резьбовых деталей с наружной резьбой при сохранении высокой производительности и минимальных сопутствующих затратах, в т.ч. на резьбонакатные инструменты, является сложной задачей, которая в полной мере не решена. Нестабильное качество крепежных деталей приводит к релаксации и разрушению резьбового соединения, раскрытию стыков и отказам изделий машиностроения. Фактические величины зазоров между сопрягаемыми резьбовыми поверхностями при свинчивании и затяжке резьбового соединения являются случайными величинами, значения которых во многих случаях по технологическим и организационным причинам не соответствуют расчетным посадкам [9,10]. Проблемы обеспечения качества внутренних резьб в данной статье не рассматриваются.

По данным экспериментов и результатам многих исследований, наибольшее влияние на качество деталей с наружной резьбой оказывает процесс резьбонакатывания, а также наследственная информация, передаваемая заготовкам при технологическом наследовании от предшествующих этапов изготовления, среди которых особое значение имеют операции токарной обработки и шлифования. [8, 9, 10, 11, 12] В частности, круглошлифовальная операция окончательно определяет диаметр заготовки под резьбонакатывание и позволяет исправить отклонения её формы от цилиндричности (бочкообразность, овальность, конусность и др.) [9, 10, 11]. Одним из

важнейших факторов, определяющих качество деталей с наружной резьбой, является состояние рабочей поверхности резбонакатных роликов. Все дефекты и отклонения формы и размеров рабочей поверхности резьбовых роликов воспроизводятся при накатывании наружной резьбы на заготовках. Эксплуатационный износ резбонакатных роликов приводит к постепенному снижению качества резьбовых деталей, вплоть до выхода их геометрических и точностных параметров за пределы допусков.

На **Рис. 1** показаны резбонакатные ролики с выраженными следами ускоренного износа и повреждениями рабочей поверхности, зафиксированными в ходе производственных экспериментов.

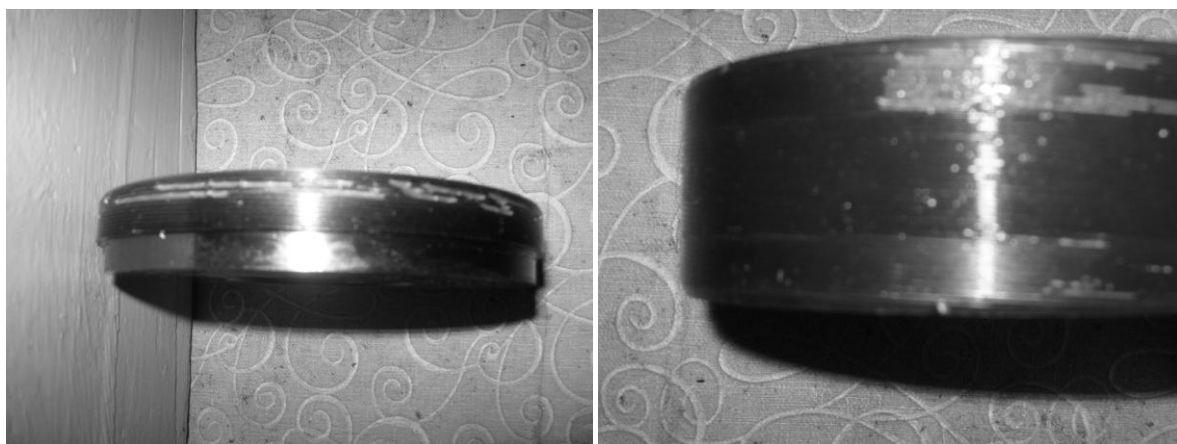


Рис. 1 – Резбонакатные ролики со следами повреждений и разрушений рабочих поверхностей в процессе эксплуатации

Теоретическое значение ориентировочной стойкости T_P (тыс. заготовок) резбонакатных роликов для двухроликовых станков, работающих с радиальной подачей, можно определить по формуле [12]

$$T_P = T_T K_M K_C K_\Phi K_T K_D, \quad (1)$$

где T_T – базовая стойкость инструмента; K_M – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от предела прочности и твердости материала заготовки; K_C – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от марки инструментальной стали; K_Φ – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от способа формообразования резьбового профиля на нём; K_T – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от размера обрабатываемой резьбы; K_D – коэффициент, учитывающий влияние диаметра резьбового ролика на его стойкость. Надежность резбонакатных роликов характеризуется, главным образом, их стойкостью, т.е. способностью накатать максимальное количество годных резьбовых деталей.

Высокая производительность является важнейшим преимуществом процесса резбонакатывания и основой для низкой себестоимости резьбовых

деталей, но делает практически невозможным проведение сплошного активного контроля их геометрических и точностных параметров. Указанная особенность приводит к тому, что некоторые внезапные и параметрические отказы технологического процесса резьбонакатывания во многих случаях не вызывают мгновенную остановку оборудования, а приводят к продолжению выпуска дефектных резьбовых деталей, что обнаруживается только при последующем контроле. Вместе с тем, такие виды скрытых дефектов резьбовых деталей с наружной резьбой, как микротрещины в резьбе, не обнаруживаются обычными средствами технического контроля, применяемыми в производственных условиях, а проявляются внезапными разрушениями резьбовых соединений, возникающими в процессе сборки, приемосдаточных испытаний либо в ходе эксплуатации изделий машиностроения. Предотвращение возникновения дефектов в резьбовых деталях, в т.ч. возникающих в ходе технологического процесса резьбонакатывания, при условии обеспечения заданной производительности, является сложной технологической проблемой, решению которой посвящен ряд российских и зарубежных публикаций, в т.ч. [8, 9, 11, 12, 13, 14, 15].

Некоторые характерные примеры различных видов брака наружных резьб, вызванных отказами в процессе резьбонакатывания, показаны на **Рис. 2**, (снизу вверх: неполная высота профиля и выкрашивание ниток резьбы; косая резьба и отслоение металла; неполная высота профиля; неравномерная высота профиля по длине и окружности; неполная длина и трещины резьбы; смятие вершин резьбы).



Рис. 2 – Примеры видов брака наружной резьбы, вызванных различными отказами в ходе резьбонакатывания

Внезапные и параметрические отказы, вероятные в ходе процесса резьбонакатывания, представлены в виде графа в [16]. Как показали исследования [10,11,16], различные отказы при резьбонакатывании, приводящие к выпуску дефектных деталей с резьбой, могут вызвать

недопустимое снижение прочности резьбовых соединений, вплоть до их разрушения. В ходе производственных экспериментов проводились наблюдения за работой резьбонакатных станков, осуществлялась визуальная оценка и выборочные измерения геометрических и точностных параметров резьбонакатных роликов и деталей с наружной резьбой, в процессе изготовления партий деталей, каждая объемом более 10 000 деталей, что позволило достоверно выявить и зафиксировать причины отказов и их последствия, а также значения времени безотказной работы и длительности восстановления.

Анализ результатов производственных экспериментов [16], показал, что расчетная стойкость резьбонакатных роликов, определяемая по формуле (1) [12], не всегда может быть достигнута в реальных условиях эксплуатации [10, 11]. Во многих случаях поступление в резьбонакатной станок одной заготовки завышенного диаметра либо избыточной твердости вызывает необратимые аварийные повреждения рабочей поверхности резьбонакатных роликов (сколы, выкрашивания, смятия), что приводит к выпуску бракованных резьбовых деталей, вплоть до обнаружения отказа и замены роликов.

Накатывание резьбы на двухроликовых станках является высокоэффективным и, вместе с тем, сложным, многопараметрическим, стохастическим процессом. [8, 9, 10] При анализе надежности процесса резьбонакатывания, в отличие от аналогичной характеристики для оборудования, целесообразно рассматривать в качестве событий отказов не только остановки технологических машин из-за неисправностей, но и выход параметров деталей за пределы допусков. Надёжность процесса резьбонакатывания зависит от ряда факторов, важнейшими из которых являются точность диаметра и формы заготовки, в том числе размеры её фаски, твердость и пластичность материала, правильность установки заготовки на станок и степень износа либо повреждения резьбонакатных роликов, соблюдение технологических режимов [9,10,11]. Необходимо отметить, что геометрические и точностные параметры заготовок и готовых деталей, формируемые на каждом из технологических переходов, являются случайными величинами, математические ожидания, дисперсии и функции распределения которых могут быть получены путем статистической обработки и анализа результатов производственных экспериментов.

Экспериментальные распределения случайных величин, для удобства дальнейшего исследования, с помощью аппарата нейронных сетей, приведенного в [17], могут быть заменены, например, обобщенным законом Эрланга второго и более высоких порядков. Многообразие различных отказов процесса резьбонакатывания значительно усложняет математическое описание его надежности. По результатам экспериментов, среднее время безотказной работы для различных видов отказов может отличаться на один–три порядка, что позволяет выделить наиболее часто встречающиеся события, преимущественно определяющие надежность исследуемого процесса резьбонакатывания.

Значения математического ожидания времени безотказной работы и восстановления отдельных элементов резбонакатывания, полученные путем статистической обработки результатов производственного эксперимента, представлены в **таблице 1**. Под элементами процесса в данном случае имеем в виду функциональные компоненты технологического оборудования и значения параметров деталей, недопустимые значения которых будем считать отказами.

Таблица 1 – Экспериментальные значения математического ожидания, ч

Наименование и характер отказов	Время безотказной работы	Время восстановления
1.Недопустимая погрешность установки заготовок	1,83	0,5
1.Неравномерная твердость и пластичность материала заготовок, недопустимые отклонения формы и размеров фаски на заготовках	16,67	4,0
3.Возникновение микротрещин в резьбовых деталях	9,1	2,0
4. Недопустимый износ и повреждение резбонакатных роликов	33,33	5,0

Проведенный анализ результатов экспериментов может быть использован для определения исходных данных, необходимых для предлагаемой ниже общей полумарковской модели, позволяющей исследовать производительность технологических процессов механосборочного производства с учетом их надежности. В частности, моделирование позволит определить фактическую производительность процесса резбонакатывания с учетом различных отказов, возможных при его осуществлении. Будем строить модель с учетом различных видов отказов и проводить анализ влияния надежности на его производительность при следующем предположении: в случае какого-либо отказа в ходе резбонакатывания обслуживание продукции прерывается, а после восстановления работоспособности оно продолжается, с учетом времени прерванного обслуживания [18, 19]. Таким образом, все виды отказов будем считать необесценивающими [18], а выпускаемую продукцию – подвергаемой 100% контролю. Практическая реализация такого контроля в данной статье не рассматривается и является предметом дальнейших исследований.

Опишем подробнее рассматриваемый процесс резбонакатывания [1, 2, 18]. Время обслуживания единицы продукции – случайная величина α_1 с функцией распределения $F_1(t) = P\{\alpha_1 \leq t\}$. Время безотказной работы –

случайной величины α_2 с функцией распределения $F_2(t) = P\{\alpha_2 \leq t\}$, время восстановления после i -го отказа – случайная величина β_i с функцией распределения $G_i(t) = P\{\beta_i \leq t\}$. Случайная величина $\alpha_1, \alpha_2, \beta_i$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания и дисперсии; у функции распределения $F_1(t), F_2(t), G_i(t)$ существуют плотности $f_1(t), f_2(t), g_i(t)$. Все отказы предполагаем — необесценивающими.

Необходимо определить функцию распределения $F_\theta(t)$ случайной величины θ – времени цикла обслуживания единицы продукции с учетом его отказов, математическое ожидание и дисперсию указанной случайной величины, а также производительность резбонакатывания.

Для описания функционирования системы используем процесс марковского восстановления $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ и соответствующий ему полумарковский процесс $\xi(t)$ [8,18] с состояниями:

$10x$ – процесс работоспособен, началось обслуживание очередной единицы продукции; время, оставшееся до отказа, равно $x \geq 0$;

$11x$ – мгновенное состояние, соответствующее моменту окончания обслуживания единицы продукции; время, оставшееся до отказа, равно $x \geq 0$;

$20x$ – произошло восстановление работоспособности процесса и продолжено прерванное обслуживание единицы продукции; время, оставшееся до окончания прерванного обслуживания, равно $x \geq 0$;

$21ix$ – произошел i -й отказ процесса, обслуживание единицы продукции прервано; время, оставшееся до окончания прерванного обслуживания, равно $x \geq 0$.

Временная диаграмма функционирования приведена в [18], граф переходов рассматриваемой системы – на **Рис. 3**.

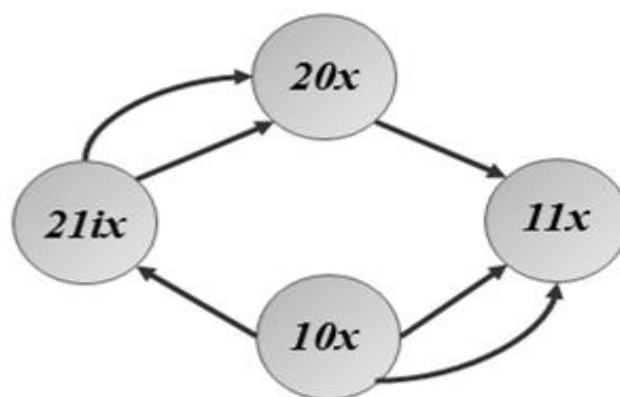


Рис.3 – Граф переходов процесса резбонакатывания

Фазовое пространство состояний имеет вид:

$$E = \{10x, 11x, 20x, 21i\}. \quad (2)$$

Определим полумарковское ядро $Q(t, x, B)$ процесса полумарковского восстановления $\{\xi_n, \theta_n, n \geq 0\}$ в дифференциальной форме [2].

$$Q(t, 10x, 11dy) = f_1(x - y) \cdot 1_{x-y}(t) dy, 0 < y < x, \quad (3)$$

где $1_{x-y}(t)$ – единичное распределение в точке

$$\begin{aligned} Q(t, 10x, 21idy) &= p_i f_2(x + y) \cdot 1_x(t) dy, y > 0, \\ Q(t, 20x, 21idy) &= p_i f_2(x - y) \cdot 1_{x-y}(t) dy, 0 < y < x, \\ Q(t, 20x, 11dy) &= f_2(x + y) \cdot 1_x(t) dy, y > 0, \\ Q(t, 11x, 10x) &= 1(t), \\ Q(t, 21x, 20x) &= G_i(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Система уравнений марковского восстановления [1, 18] будет иметь вид:

$$\begin{cases} \bar{\Phi}_1(x, t) = \sum_{i=1}^n \int_0^{t-x} f_1(x + y) p_i \bar{\Phi}_{3i}(y, t - x) dy + \bar{F}_1(t), \\ \bar{\Phi}_2(x, t) = \sum_{i=1}^n \int_0^x f_2(x - s) p_i \bar{\Phi}_{3i}(s, t - x + s) ds, \\ \bar{\Phi}_{3i}(x, t) = \int_0^{t-x} g_i(t - x - \tau) \bar{\Phi}_2(x, x + \tau) d\tau + \bar{G}_i(t - x), \end{cases} \quad (5)$$

Решать систему интегральных уравнений Вольтерры второго рода (5) будем методом последовательных приближений [20].

Подставим в системе (5) третье уравнение во второе, получим:

$$\bar{\Phi}_2(x, t) = \sum_{i=1}^n \int_0^x f_2(x - s) p_i ds \left[\int_0^{t-x} g_i(t - x - \tau) \bar{\Phi}_2(s, s + \tau) d\tau + \bar{G}_i(t - x) \right]; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_2(x, t) &= \sum_{i=1}^n p_i \int_0^x f_2(x - s) ds \int_0^{t-x} g_i(t - x - \tau) \bar{\Phi}_2(s, s + \tau) d\tau + \\ &+ \sum_{i=1}^n p_i \int_0^x f_2(x - s) \bar{G}_i(t - x) ds \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_2(x, t) &= \sum_{i=1}^n p_i \int_0^x f_2(x - s) ds \int_0^{t-x} g_i(t - x - \tau) \bar{\Phi}_2(s, s + \tau) d\tau + \\ &+ \sum_{i=1}^n p_i F_2(x) \bar{G}_i(t - x) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_2(x, t) = & \sum_{i=1}^n p_i \int_0^x ds \int_0^{t-x} f_2(x-s) g_i(t-x-\tau) \bar{\Phi}_2(s, s+\tau) d\tau + \\ & + \sum_{i=1}^n p_i F_2(x) \bar{G}_i(t-x)\end{aligned} \quad ; \quad (9)$$

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_2(x, t) = & \sum_{i=1}^n p_i \int_0^{t-x} g_i(t-x-\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) \bar{\Phi}_2(s, s+\tau) ds + \\ & + \sum_{i=1}^n p_i F_2(x) \bar{G}_i(t-x)\end{aligned} \quad . \quad (10)$$

Обозначим $g_\Sigma(x) = \sum_{i=1}^n p_i g_i(x)$ и $G_\Sigma(x) = \sum_{i=1}^n p_i G_i(x)$, тогда:

$$\bar{\Phi}_2(x, t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) \bar{\Phi}_2(s, s+\tau) ds + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x). \quad (11)$$

Найдем нулевое (начальное) приближение:

$$\bar{\Phi}_2^0(x, t) = F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x). \quad (12)$$

Первое приближение будет иметь вид:

$$\bar{\Phi}_2^1(x, t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) F_2(s) \bar{G}_\Sigma(\tau) ds + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x); \quad (13)$$

$$\bar{\Phi}_2^1(x, t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) \bar{G}_\Sigma(\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) F_2(s) ds + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x); \quad (14)$$

$$\bar{\Phi}_2^1(x, t) = \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) \bar{G}_\Sigma(\tau) d\tau F_2^*(x) + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x); \quad (15)$$

$$\bar{\Phi}_2^1(x, t) = F_2^*(x) \bar{G}_\Sigma^*(t-x) + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x). \quad (16)$$

Найдем второе приближение:

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_2^2(x, t) = & \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) \bar{G}_\Sigma^*(\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) F_2^*(s) ds + \\ & + \int_0^{t-x} g_\Sigma(t-x-\tau) \bar{G}_\Sigma(\tau) d\tau \int_0^x f_2(x-s) F_2(s) ds + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t-x)\end{aligned} \quad ; \quad (17)$$

$$\bar{\Phi}_2^2(x, t) = F_2^{*(2)}(x) \bar{G}_\Sigma^{*(2)}(t - x) + F_2^*(x) \bar{G}_\Sigma^*(t - x) + F_2(x) \bar{G}_\Sigma(t - x). \quad (18)$$

Тогда m -е приближение будет иметь вид:

$$\bar{\Phi}_2^m(x, t) = \sum_{j=1}^m F_2^{*(j)}(x) \bar{G}_\Sigma^{*(j)}(t - x). \quad (19)$$

Таким образом, решение системы (5) имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_2(x, t) &= \sum_{j=1}^{\infty} F_2^{*(j)}(x) \bar{G}_\Sigma^{*(j)}(t - x), \\ \bar{\Phi}_{3i}(x, t) &= \int_0^{t-x} g_i(t - x - \tau) \sum_{j=1}^{\infty} F_2^{*(j)}(x) \bar{G}_\Sigma^{*(j)}(\tau) d\tau + \bar{G}_i(t - x), \\ \bar{\Phi}_1(x, t) &= \sum_{i=1}^n \int_0^{t-x} f_1(x + y) p_i \bar{\Phi}_{3i}(y, t - x) dy + \bar{F}_1(t), \end{aligned} \quad (20)$$

где n – количество видов отказов в рассматриваемом процессе.

Формула (20) определяет функцию распределения $\bar{\Phi}_1(x, t)$ времени цикла обслуживания на технологической ячейке единицы продукции, которая зависит от начального состояния $10x$, содержащего непрерывную компоненту x . Для того, чтобы получить функцию распределения $F_\theta(t)$ случайной величины θ – времени цикла обслуживания на технологической ячейке единицы продукции – вне зависимости от начального состояния, проведем операцию усреднения по формуле [1]:

$$F_\theta(t) = \frac{\int \rho(dx) F_x(t)}{\rho(E_k)}, \quad (21)$$

где $\rho(dx)$ – стационарное распределение вложенной цепи Маркова $\{\xi_n, n \geq 0\}$, $F_x(t)$ – функция распределения времени пребывания в состоянии x , E_k – исследуемое подмножество состояний.

В монографии [18] показано, что решение для системы определяется формулами

$$\rho_{10}(x) = \rho_{11}(x) = \rho_0 \bar{F}_2(x); \quad (22)$$

$$\rho_{20}(x) = \rho_0 \bar{F}_1(x), \quad (23)$$

$$\rho_{21i}(x) = p_i \rho_0 \bar{F}_1(x), \quad (24)$$

где p_i – вероятность i -го отказа.

Искомая функция распределения $F_\theta(t)$ случайной величины θ – времени цикла обслуживания единицы продукции процесса с учетом его отказов равна:

$$\overline{F_\theta}(t) = \frac{\int_0^\infty \overline{F_2}(x) \Phi_1(x, t) dx}{M\alpha_2}. \quad (25)$$

Полученная формула (25) дает нам возможность полностью описать поведение исследуемой системы в целом. Пример результатов моделирования с использованием формулы (25) представлен на **Рис. 4**.

Исходными данными для моделирования служат функции распределения $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$, $G_3(t)$ и $G_4(t)$; они распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка, причем:

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

где $\lambda_1 = 1,101 \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 10,899 \text{ ч}^{-1}$;

$$f_2(t) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})}{\alpha_2 - \alpha_1},$$

где $\alpha_1 = 0,1101 \text{ ч}^{-1}$, $\alpha_2 = 1,0899 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_1(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1},$$

где $\mu_1 = 2,202 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_2 = 21,798 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_2(t) = \frac{\beta_1 \beta_2 (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t})}{\beta_2 - \beta_1},$$

где $\beta_1 = 0,275 \text{ ч}^{-1}$, $\beta_2 = 2,725 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_3(t) = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2 - \gamma_1},$$

где $\gamma_1 = 0,551 \text{ ч}^{-1}$, $\gamma_2 = 5,449 \text{ ч}^{-1}$;

$$g_4(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1},$$

где $\nu_1=0,220 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_2=2,180 \text{ ч}^{-1}$.

Моделирование проводилось для четырех различных видов отказов, параметры которых приведены в **Таблице 1**. Для упрощения процедуры моделирования и получения более наглядных результатов, в модели предусмотрена возможность проведения расчетов для групп деталей по 10 – 100 шт., входящих в состав крупных партий объемом от 10000 шт.

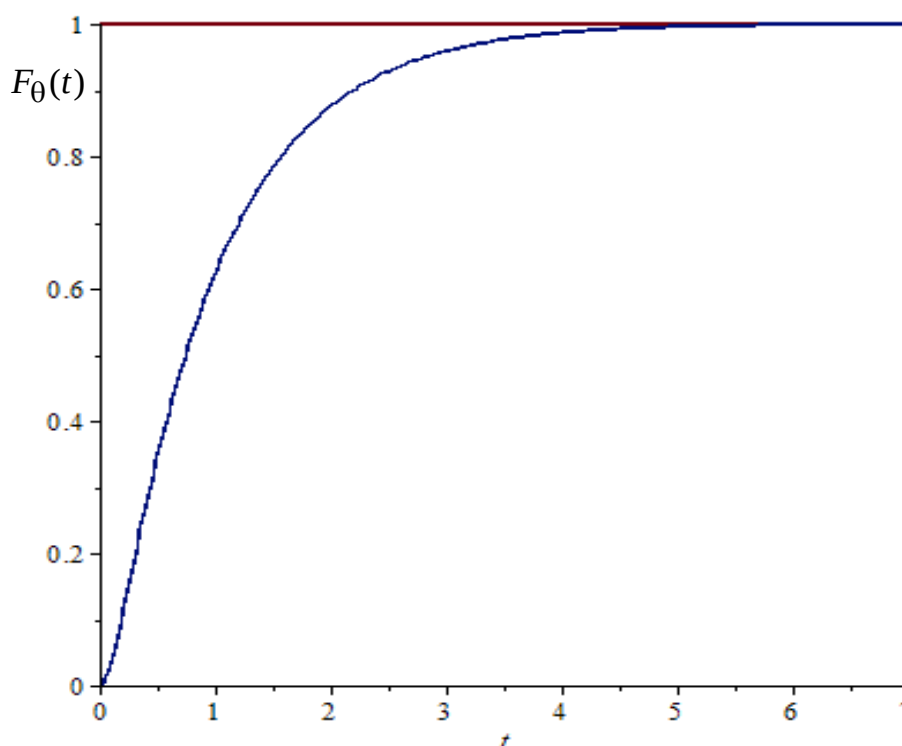


Рис. 4 – Вид функции распределения $F_{\theta}(t)$

Математическое ожидание полученной в результате моделирования функции распределения составляет 1,01482 ч.

Заключение. Экспериментально подтверждено, что только при накатывании резьбы на заготовках, имеющих форму и размеры в пределах заданных допусков, при условии стабильности значений твердости и пластичности материала, соответствующих стандарту, стойкость резьбонакатных роликов может достигать значений, близких к теоретическим, определенным по формуле (1) [12].

Полученные результаты могут использоваться при анализе резервов повышения качества и производительности процесса получения наружной резьбы накатыванием.

Учитывая тесную взаимосвязь процессов изготовления резьбовых деталей и сборки изделий машиностроения, содержащих резьбовые соединения, полученные результаты моделирования процесса резьбонакатывания могут использоваться в качестве исходных данных для модели автоматизированного механосборочного производства, информационно и структурно совместимой с предложенной в статье.

На основе полученных результатов могут быть поставлены и решены многие практические задачи, в частности, оптимального распределения ограниченных средств на модернизацию резьбонакатного оборудования [18]. Результаты могут быть также использованы при проектировании и модернизации автоматизированных производственных систем механосборочного производства [18, 19, 21].

Направление дальнейших исследований связано с практической реализацией эффективного контроля резьбовых деталей, а также с построением математической модели для анализа процесса резьбонакатывания с преимущественным проявлением обесценивающих отказов. Предполагается также проведение имитационного моделирования, позволяющего оценить адекватность предложенной полумарковской модели.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 1.10513.2018/11.12), при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 19-01-00704)

Библиографический список

1. Королук В.С., Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В.С.Королук, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1982. – 236 с.
2. Королук В.С. Стохастические модели систем / Отв. ред. А.Ф.Турбин. – К: Наук.думка. 1989. – 208 с.
3. Королук В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С.Королук, А.Ф. Турбин. – К.: Наук.думка, 1976. – 181 с.
4. 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 СевНТУ, 2000. – 284 с.
5. Броди С.М. Расчет и планирование испытаний систем на надежность / С.М Броди, О.Н Власенко, Б.Г. Марченко. – К.: Наукова думка, 1970. – 192 с.
6. Obzherin Yu.E., Boyko Ye.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. / Yu.E. Obzherin, Ye.G. Boyko // Elsevier, Academic press, USA, 2015. – 214 p.
7. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. / A.I. Peschansky // Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
8. Rapatskiy Yu. Research of reliability and efficiency of technological processes of mechanical assembly production on the basis of the common semi-Markov model / Yuri Rapatskiy, Mikhail Zamorenov, Vadim Kopp, Yuri Obzherin, Vladimir Gusev, Viktoria Lipka // MATEC Web of Conferences 224, 01138 (2018), ICMTMTE218 – P.1 – 8
9. Липка В.М. Анализ воздействия технологической наследственности при изготовлении деталей с резьбой на надежность резьбовых соединений в судовых машинах и механизмах / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Ушаковские чтения: Материалы Пятой Межвузовской научно-практической конференции

- (Севастополь, 22–23 февраля 2018 г.). – Севастополь: ООО «ПК КИА», 2018. – С.61 – 69
10. Липка В.М. Повышение надежности резьбовых соединений при сборке автомобильных силовых агрегатов/ В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Высокие технологии в машиностроении: сб. науч. трудов. –Харьков, НТУ «ХПИ», 2012. – Вып.1 (22). – С. 199–210.
 11. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резьбонакатывание.: Библиотека технолога. — М.: Машиностроение, 2009. —312 с.
 12. Якухин В.Г. Высокотехнологичные методы металлообработки.: Учебник. — Под ред. О.В. Таратынова. — М.: МГИУ, 2011. —362 с.
 13. Афонин А.Н. Схемы деформирования при накатывании резьб / А.Н. Афонин, А.В. Киричек // Известия ОрелГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: сб. науч. тр. — Орел, 2009. — Вып. 6/278 (577). — С. 39–42.
 14. Киричек А.В. Определение диаметра заготовок под накатывание резьбы с помощью систем 3D моделирования / А.В. Киричек, А.Н. Афонин // СТИН. — 2005. — №6. — С. 28–30.
 15. Прокофьев А.Н. Разработка системы выбора оптимального метода обработки резьбы. // Качество машин. Сборник трудов. Брянск. – БГТУ. – 2001. – С.88 – 89.
 16. Рапацкий Ю.Л. Исследование надежности процесса накатывания наружной резьбы / Ю.Л. Рапацкий, В.Я. Копп, М.В. Заморёнов, В.М. Липка // Автоматизация и измерения в машино – приборостроении: науч. журн. – 2018. – №3 (3) – С. 3-15.
 17. Копп В.Я. Использование нейронных сетей при анализе функционирования технической структуры с временным резервированием / В.Я. Копп, А.Л. Карташов, М.В. Заморенов, Л.Е. Карташов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12: в 2 ч. Ч. 1 Тула: Изд-во ТулГУ, 2015 — С. 67 – 80.
 18. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем: монография. — Севастополь: СевНТУ, 2012. — 700 с.
 19. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных линий / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. Монография. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – 240 с.
 20. Михлин С.Г. Интегральные уравнения и их приложения к некоторым проблемам механики, математической физики и техники. М.: Гостехиздат, 1949. — 380 с.
 21. Ямпольский Л.С. Автоматизация проектирования и управления в гибком автоматизированном производстве/ Л.С. Ямпольский, З.П. Банашак. — К.: Техника, 1989. — 214 с.

Bibliograficheckiy spisok

1. Korolyuk V.D Processy-markovskogo-vosstanovleniya-v-zadachah-nadezhnosti-sistem / V.S. Korolyuk, A. F. Turbin// K Nauk-dumka-1982-236-s.
2. Korolyuk V. S. Stohasticheskie-modeli-sistem-otv-red-a-f-turbin-k-nauk-dumka-1989-208-s.

3. Korolyuk V. S. Polumarkovskie-processy-i-ih-prilozheniya / V.S Korolyuk-A.F Turbin/ K. Nauk-dumka-1976-181-s
4. Kopp V. Y. Obzherin-yu-e-peschanskij-a-i-stohasticheskie-modeli-avtomatizirovannyh-proizvodstvennyh-sistem-s-vremennym-rezervirovaniem / V.Y. Kopp. Yu. E. Obzherin, A. P. Peschanskij. Sevastopol-izd-vo-sevntu-2000-284-s.
5. Brodi S. M. Raschet-i-planirovanie-ispytaniy-sistem-na-nadezhnost. / S.M. Brodi, O.N. Vlasenko, B. G. Marchenko. K. Naukova-dumka-1970-192-s.
6. Obzherin Yu. E. Boykoye. Models control of restorable systems with latent failures. Yu. E. Obzherin, Ye. G. Boyko. Elsevier academic-press-usa-2015-214-p.
7. Peschansky A.I. Semi markov models of one server loss queues with recurrent input, A. I. Peschansky, Germany lap-lampert. academic-publishing-2013-138-p
9. Rapatskiy Yu. Research-of-reliability-and-efficiency-of-technological-processes of mechanical assembly production on the basis of the common semi markov model./ Yr. M. Zamorenov, V. Kopp, Y. Obzherin, V. G. Viktorialipkamatec. web-of-conferences-224-01138-2018-icmtmte218-p-1-8.
10. Lipka V.M. Analiz-vozdzejstviya-tekhnologicheskoy-nasledstvennosti-pri-izgotovlenii-detalej-s-rezboj-na-nadezhnost-rezbovyh-soedinenij-v-sudovyh mashinah i mekhanizmah. V.M. Lipka, i dr. Nauchno-prakticheskoy-konferencii-sevastopol 22-23 fevralya 2018-g-sevastopol-ooo pk kia-2018-s-61-69.
11. Lipka V.M. Povyshenie-nadezhnosti-rezbovyh-soedinenij-pri-sborke-avtomobilnyh silovyh agregatov. V.M. Lipka. Y. L. Rapackij. Vysokie-tehnologii-v-mashinostroenii-sb-nauch-trudov-harkov-ntu-hpi-2012-vyp-1-22-s-199-210
12. Kirichek A.V. Afonin, Anrezbonakatyvanie-biblioteka-tekhnologa-m-mashinostroenie-2009-312-s.
13. Yakuhin V.G. Vysokotekhnologichnye-metody-metalloobrabotki-uchebnik-pod-red-o-v-taratynova-m-mgiu-2011-362-s
13. Afonin A.F. Skhemy-deformirovaniya-pri-nakatyvanii-rezb-a-n-afonin-a-v-kirichek-izvestiya-orelgtu-ser-fundamentalnye-i-prikladnye-problemy-tehniki-i-tehnologii-sb-nauch-tr-orel-2009-vyp-6-278-577-s-39-42
14. Kirichek A. V. Opredelenie-diametra-zagotovok-pod-nakatyvanie-rezby-s-pomoshchyu-sistem-3d-modelirovaniya. A.V. Kirichek, A.N. Afonin. Stin-2005-6-s-28-30.
15. Prokofev A.N. Razrabotka sistemy vybora optimalnogo metoda obrabotki rezby kachestvo mashin sbornik trudov Bryansk bgtu-2001-s-88-89.
16. Rapackij Yu. L. Isslelovanie-nadezhnosti-processa-nakatyvaniya-naruzhnoj rezby. Yu. L. Rapackij i dr. – Avtomatizaciya i izmereniya-v-mashino-priborostroenii-nauch-zhurn-2018-3-3-s-3-15.
- 17-Kopp V. Ya. Ispolzovanie-nejronnyh-setej-pri-analize-funkcionirovaniya-tekhnicheskoy-struktury-s-vremennym-rezervirovaniem-v-ya-kopp-a-l-kartashov-m-v-zamorenov-l-e-kartashov-izvestiya-tulgu-tekhnicheskie-nauki-vyp-12-v-2-ch-ch-1-tula-izd-vo-tulgu-2015-s-67-80.
- 18-Kopp V. Ya. Modelirovanie-avtomatizirovannyh-proizvodstvennyh-sistem-monografiya-sevastopol-sevntu-2012-700-s.

19. Kopp V. Ya. Modelirovanie-avtomatizirovannyh-linij-v-ya-kopp-yu-e-obzherin-a-i-peschanskij-monografiya-sevastopol-izd-vo-sevntu-2006-240-s.

20. Mihlin S. G. Integralnye-uravneniya-i-ih-prilozheniya-k-nekotorym-problemam-mekhaniki-matematicheskoy-fiziki-i-tehniki-m-gostekhizdat-1949-380-s.

21. Yampolskij L. S. Avtomatizaciya proektirovaniya i upravleniya v gibkom-avtomatizirovannom proizvodstve, L.S. Yampolskij, Z. P. Banashak. – K. Tehhnika-1989-214-s.

Рапацкий Юрий Леонидович, к.т.н., доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», директор Центра оценки качества образования, u.l.rapatskiy@mail.ru, +7(978)7679650, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Заморенов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы», zamik@mail.ru, +7(978)7420003, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Копп Вадим Яковлевич, д-р техн. наук, проф. кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», v_kopp@mail.ru, +7(978)7420007, Россия, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Обжерин Юрий Евгеньевич, д-р техн. наук, проф. кафедры «Высшая математика», YEObjerin@sevsu.ru, +7(978)8221328, Россия, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Липка Виктория Михайловна, магистр, старший преподаватель, аспирант, lipka.vita@yandex.ru, +7(978)7673271, Россия, Севастополь, Филиал «ГМУ им. Адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.²

Аннотация. Дан анализ одного класса оптимальных управлений (типа «разгон-торможение») движением объекта. С использованием численных примеров оценена энергоемкость управляемого движения, выявлено существенное снижение энергии для реализации оптимальных управлений. Управления сконструированы с использованием алгоритма, основанного на реверсионном принципе оптимальности (РПО). Показано, что при практической реализации сконструированных управлений не исключается замена одного типа управления другим на основании баланса энергий.

Ключевые слова. Оптимальное движение, кососимметричные управления, энергоемкость управлений.

Введение. Теории оптимального управления движением объектов посвящены работы [1-6], с использованием которых решено множество актуальных задач современной техники.

Работы [7-10] посвящены исследованиям оптимального переносного движения упругих систем с конечным числом степеней свободы. В монографии [11] приведен алгоритм аналитического конструирования разнообразных типов кососимметричных оптимальных управлений с использованием реверсивного принципа оптимальности (РПО) для перемещений объектов как абсолютно твердых и деформируемых систем.

При конструировании управляемого движения (от функции – к функционалу-критерию) с учетом цели движения и ограничений по полученной функции, как решению уравнения Эйлера, восстанавливался функционал. Решение такой полной обратной задачи вариационного исчисления названо реверсионным исчислением [10-11].

Цель исследований – оценка энергоемкости различных вариантов характерного типа кососимметричного оптимального управления перемещением объекта [12-14] из исходного состояния абсолютного покоя в конечное состояние абсолютного покоя за минимально возможное время движения, которое зависит от возможностей практической реализации, а в случае упругого объекта – находится из множества общих корней моментных соотношений.

Расчет потребления энергии на оптимальное движение типа «разгон-торможение».

Согласно [11] оптимальное управление в виде непрерывной непериодической функции в наиболее общем виде представимо следующим образом:

$$U_e(T) = \frac{a_p(T - 2t)^{n_1}}{T^{n_1}}, \quad (1)$$

где $n_1 = 2n - 1$, $n = 1, 2, 3, \dots$, $a_p = \text{const}$. Уравнение (1) является решением уравнения Эйлера

$$\frac{d^{(2n_1)} U_e}{dt^{(2n_1)}} = 0, \quad (2)$$

где $2n_1$ – порядок производной. Уравнению (2) соответствует функционал

$$J = \int_0^T [U_e^{(n_1)}]^2 dt. \quad (3)$$

В соответствии с целью исследований рассматриваются частные случаи движения, для которых вычисляется энергия и сравнивается с известным классическим примером оптимального управления, найденным вариационным методом.

1. В наиболее простом случае, когда производная в критерии (1) отсутствует, в теории оптимального управления критерий имеет вид

$$J = \int_0^T [U_e(t)]^2 dt \quad (4)$$

с дифференциальным уравнением движения (без учета сопротивления)

$$\frac{d^2 S_e}{dt^2} = U_e(t) \quad (5)$$

и краевыми условиями

$$S_e(0) = 0, \quad \dot{S}_e(0) = 0, \quad S_e(T) = L, \quad \dot{S}_e(T) = 0. \quad (6)$$

Как известно, управление, скорость и перемещение принимают вид:

$$U_e = \frac{6L(T - 2t)}{T^3}; \quad V_e = \frac{6L(Tt - t^2)}{T^3}; \quad S_e = \frac{L(3Tt^2 - 2t^3)}{T^3}, \quad (7)$$

где $a = 6L/T^2$, T – общее время движения.

Исходные данные, принятые для всех частных случаев управляемого движения: $L = 1$ м, $T = 1$ с, $m = 1$ кг. Графики согласно (7) для перемещения $S_e(t)$, скорости $V_e(t)$ и ускорения-управления $U_e(t)$ изображены на **Рис.1**.

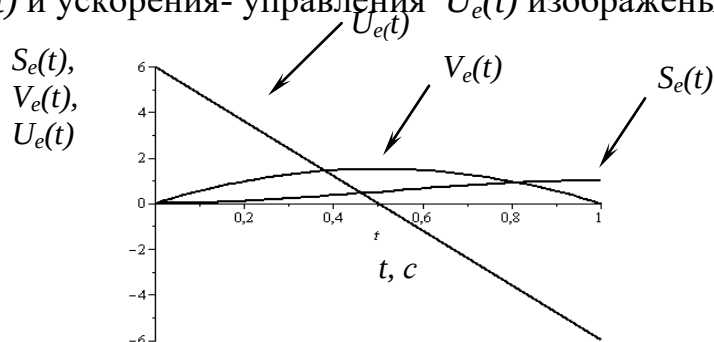


Рис.1 – Графики $S_e(t)$, $V_e(t)$, $U_e(t)$

Для принятых исходных данных энергия, затраченная на реализацию движения, вычисляется так:

$$A_0 = 2 \int_0^{T/2} m U_e(t) V_e(t) dt = 2,25 \text{ Дж.} \quad (8)$$

2. При $n_1 = 3$ управление согласно (1) принимает вид:

$$U_e(T) = \frac{a_3(T - 2t)^3}{T^3}. \quad (9)$$

Дважды интегрируя (9) с учетом условий $S_e(T/2) = L/2$, $S_e(T) = L$, $V_e(T) = 0$, находим константы и выражения для перемещения и скорости:

$$U_e = \frac{a(T - 2t)^3}{T^3}; \quad V_e = \frac{10Lt(T - t)(2t^2 - 2Tt + T^2)}{T^5};$$

$$S_e = \frac{Lt^2(5T^3 - 10T^2t + 10t^2T - 4t^3)}{T^5}, \quad (10)$$

где $a = 10L/T^2$.

Графики для $S_e(t)$, $V_e(t)$ и $U_e(t)$ изображены на **Рис.2**.

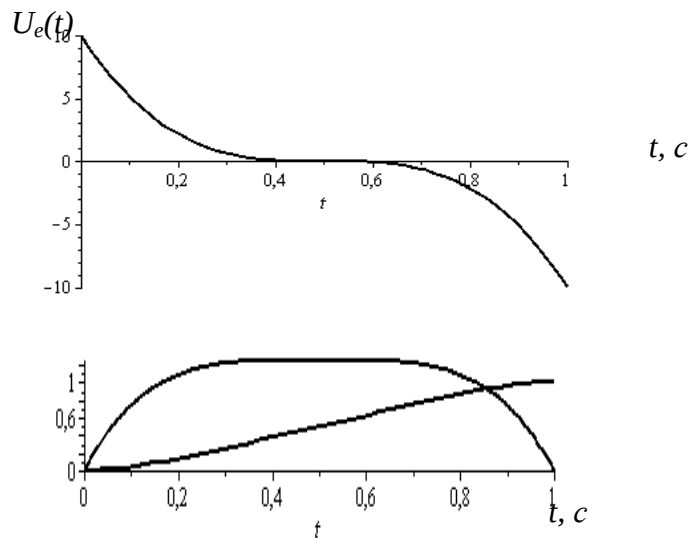


Рис.2 – Графики $S_e(t)$, $V_e(t)$, $U_e(t)$

В данном случае управление – существенно нелинейная функция. Энергия управления равна $A_3 = 2 \int_0^{T/2} m U_e(t) V_e(t) dt = 1,5625$ Дж. Экономия энергии (в процентах)

$$\Delta A = \frac{A_0 - A_3}{A_0} \cdot 100\% = \frac{2,25 - 1,5625}{2,25} \cdot 100\% = 30,58\%.$$

По мере роста n_1 наблюдается снижение затрат энергии на реализацию оптимального перемещения типа «разгон-торможение». При $n_1 = 5$ в

соответствии с приведенным ранее алгоритмом преобразования получено управление, которое приводит к экономии энергии $\Delta A = 39,51\%$.

Соответственно для $n_1 = 7$ $\Delta A = 43,75\%$, а для $n_1 = 9$ экономия энергии составляет $\Delta A = 46,22\%$.

При $n_1 = 11$ управление, скорость и перемещение записываются как:

$$\begin{aligned} U_e &= \frac{a(T - 2t)^{11}}{T^{11}}; & V_e &= \frac{13L}{12T} - \frac{13L(T - 2t)^{12}}{12T^{13}}; \\ S_e &= \frac{L(T - 2t)^{13}}{24T^{13}} + \frac{13Lt}{12T} - \frac{L}{24}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $a = 26L/T^2$.

Графики $S_e(t)$, $V_e(t)$ и $U_e(t)$ изображены на **Рис.3**. Экономия энергии $\Delta A = 47,83\%$.

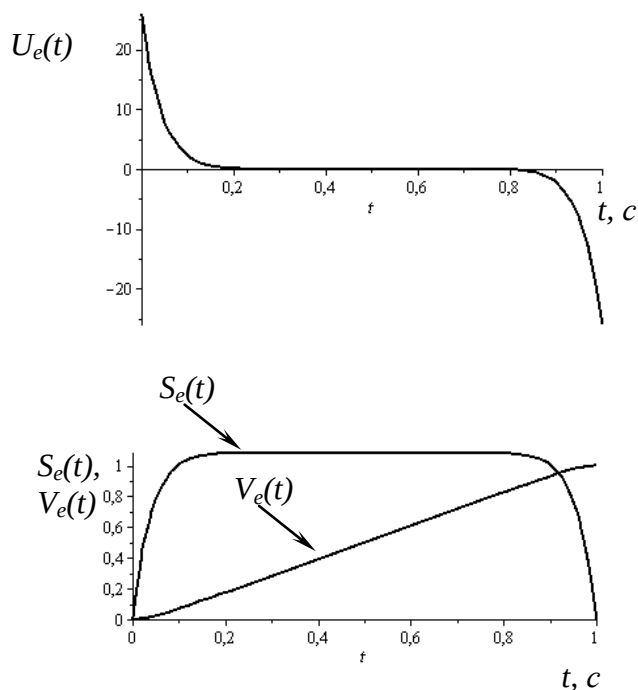


Рис.3 – Графики $S_e(t)$, $V_e(t)$, $U_e(t)$ при $n_1 = 11$

Полученные результаты проверялись с использованием альтернативного алгоритма преобразований. Например, в случае $n_1 = 11$ выражение для управления можно представить в виде полинома

$$U_e(t) = \sum_{i=1}^{14} C_i t^{i-1} \quad (12)$$

с использованием граничных условий и условием косой симметрии:

$$\begin{aligned} U_e(0) &= a, & U_e(T) &= -a, & U_e(T/2) &= 0, & S_e(T) &= L, & V_e(T) &= 0, \\ \frac{dU_e}{dt}\left(\frac{T}{2}\right) &= 0, & \frac{d^2U_e}{dt^2}\left(\frac{T}{2}\right) &= 0, & \frac{d^3U_e}{dt^3}\left(\frac{T}{2}\right) &= 0, & \frac{d^4U_e}{dt^4}\left(\frac{T}{2}\right) &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\int_0^{T/2} U_e(t) dt + \int_{T/2}^T U_e(t) dt = 0.$$

После определения констант из системы (13) и факторизации полиномов, выражения для перемещения, скорости и ускорения (управления) принимают вид (11), графики $S_e(t)$, $V_e(t)$ и $U_e(t)$ приведены на рисунке 3.

Для оценки интенсивности снижения энергоемкости на рисунке 4 изображен график зависимости затрачиваемой на оптимальное движение энергии от степени полинома, отражающего тип управления.

График **Рис. 3** показывает, что управление состоит из двух импульсов противоположного знака (изменяющихся соответственно от 0 до 0,2 с и от 0,8 с до 1 с.). Для практической реализации таких импульсов не исключается эквивалентная по сообщаемой энергии замена исходного импульса другим, который облегчает его практическую реализацию. Например, на интервале $0,2 \leq t \leq 1$ возможна замена исходного импульса импульсом вида

$$U(t) = \frac{U_1 t}{T} - \frac{U_1 t^2}{T^2},$$

для которого

$$V(t) = \frac{U_1 t^2}{2T} - \frac{U_1 t^3}{3T^2}, \quad S(t) = \frac{U_1 t^3}{6T} - \frac{U_1 t^4}{12T^2}.$$

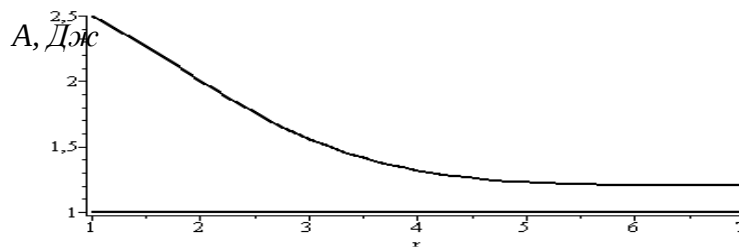


Рис.4 – График снижения энергозатрат в зависимости от типа управления

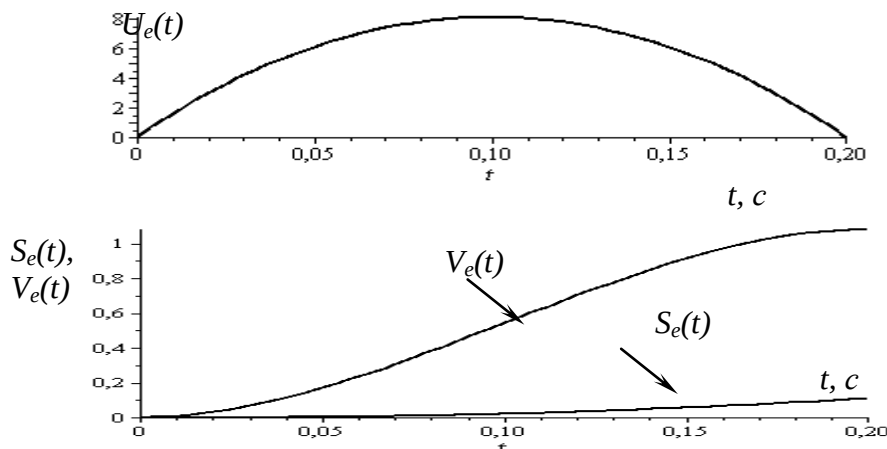


Рис.5 – Графики движения на первом участке при эквивалентном импульсе

Параметры импульса находятся из условия баланса энергий, что позволяет получить одинаковые перемещения и скорости движения тела после окончания действия такого импульса. Эквивалентный импульс находится из следующего уравнения баланса энергий:

$$\int_0^{T/2} mU_e(t)V_e(t)dt - \int_0^{T/2} mU(t)V(t)dt = 0. \quad (14)$$

Графики 3 и 5 показывают, что при $t = 0,2c$. перемещение и скорость тела от эквивалентного воздействия практически равны значениям перемещения и скорости от исходного оптимального воздействия.

Выводы. Стремление к экономии энергии для реализации движений привело к использованию эквивалентных импульсных воздействий, обеспечивающих требуемый разгон либо торможение объекта.

Кососимметричные управления типа $U_e(t) = asin^n(pt)$ не приводят к экономии энергии, но позволяют достигать абсолютного покоя упругого объекта при перемещении на заданное расстояние за минимально возможное время.

Исследованное оптимальное управление (1) применимо и для перемещения упругих систем из состояния абсолютного покоя в новое состояние абсолютного покоя за приемлемое минимально возможное время, которое является одним из корней системы трансцендентных уравнений (моментных соотношений).

Библиографический список

- 1.Воронов А.А. Теория автоматического регулирования. ч II. Теория нелинейных систем автоматического регулирования; под ред. А.А. Воронова.– М.: Госиздат, 1955. – 248 с.
- 2.Карновский Н.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем/ И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк.,1982. – 116 с.
- 3.Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
- 4.Черноусько Ф.П. Управление колебаниями/ Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
- 5.Черноусько Ф.П. Манипуляционные роботы: Динамика, управление, оптимизация/ Ф.П. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
- 6.Акуленко Л.Д. Динамические модели упругих манипуляционных роботов / Л.Д. Акуленко, С.А. Михайлов, О.Л. Сатовская. – М.: Изд-во Инст. Проблем механики АН СССР, 1988. – 46 с.
- 7.Бохонский А.И. Расчет и проектирование исполнительных органов манипуляторов: Учеб. пособие / А.Н. Бохонский, Г.Г. Макухина, Ю.А. Хацин. – К.: УМК ВО, 1989. – 132 с.
- 8.Бохонский А.И., Варминская Н.И., Мозолевский М.И. Оптимальное управление движением деформируемых объектов: теория и техническое

приложения / под. общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.

9. Бохонский А.И. Варминская Н.И. Вариационные и реверсионные исчисления в механике: монография / под. общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.

10. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления. Монография. Palmarium Academic Publishing, 2013. – 84 с.

11. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. Монография. М. Вузовский учебник. ИНФРА – М, 2016. – 174 с.

12. Бохонский А.И. Майстришин М.М., Рыжков А.И. Оптимальное перемещение упругого объекта с учетом в относительном движении линейно-вязкого сопротивления. Современные проблемы теории машин: Материалы международной заочной научно-технической конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 7 – 9.

13. Бохонский А.И., Рыжков А.И. Конструирование управляемого движения объекта. Мехатроника, автоматика и робототехника: Материалы международной научно-технической конференции. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 64 – 69.

14. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов. Материалы международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 38 – 41.

Bibliograficheskiy spisok

1. Voronov A.A. The theory of automatic control. h II. Theory of non-linear automatic control systems; by ed. A.A. Voronova. - M.: Gosizdat, 1955.-248 p.

2. Karnovsky N.A. Optimal control methods for oscillations of deformable systems / I.A. Karnovsky, Yu.M. Postman. - K.: Higher. shk., 1982. - 116 s.

3. Krutko P.D. Inverse problems of the dynamics of controlled systems: Linear models / P.D. Krutko. - M.: Science, 1987. - 304 p.

4. Chernousko F.P. Oscillation control / F.L. Chernousko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. - M.: Science, 1980. - 384 p.

5. Chernousko F.P. Manipulation robots: Dynamics, control, optimization / F.P. Chernousko, N.N. Bolotnik, V.G. Gradetsky. - M.: Science, 1989. - 368 p.

6. Akulenko L.D. Dynamic models of elastic handling robots / L.D. Akulenko, S.A. Mikhailov, O.L. Satovskaya. - M.: Publishing House of Inst. The problem of mechanics of the Academy of Sciences of the USSR, 1988. - 46 p.

7. Bohonsky A.I. Calculation and design of executive bodies of manipulators: Proc. manual / A.N. Bohonsky, G.G. Makukhina, Yu.A. Hashchin. - K.: УМК ВО, 1989. - 132 p.

8. Bohonsky A.I., Varminskaya N.I., Mozolevsky M.I. Optimal control of the movement of deformable objects: theory and mechanical applications / under. total ed. A.I. Bohonsky. - Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2007. - 296 p.

9.Bohonsky A.I. Varminskaya N.I. Variational and reversion calculus in mechanics: monograph / under. total ed. And I. Bokhonsky. - Sevasto-pol: SevNTU, 2012. - 212 p.

10.Bohonsky A.I. Actual problems of the calculus of variations. Monograph. Palmarium Academic Publishing.

11.Bohonsky A.I. Reversal principle of optimality. Monograph. M. University textbook. INFRA - M, 2016. - 174 p.

12.Bohonskyi A.I. Maystrishin MM, Ryzhkov A.I. The optimal displacement of an elastic object, taking into account the linear-viscous resistance in relative motion. Modern problems of the theory of machines: Materials of the international correspondence scientific and technical conference. - Novokuznetsk: SIC MS, 2017. - P.7 - 9.

13.Bohonsky A.I., Ryzhkov A.I. Designing the controlled movement of the object. Mechatronics, Automation and Robotics: Materials of the international scientific and technical conference. Novokuznetsk: SIC MS, 2017. - p. 64 - 69.

14.Bohonsky A.I. The energy intensity of managing the movement of objects. Materials of the international scientific practical conference. – Novokuznetsk, 2017. – P. 38-41.

EVALUATION OF THE CONTROLS MOVING OBJECTS

A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya

An analysis of one class of optimal controls (such as “acceleration and deceleration”) by the movement of an object is given. Using numerical examples, the energy intensity of the controlled motion was estimated, a significant decrease in energy was found for the implementation of optimal controls. Controls are constructed using an algorithm based on the reverse optimality principle. It is shown that the practical implementation of designed controls does not preclude the replacement of one type of control by another on the basis of the energy balance.

Key words: optimal motion, skew-symmetric controls, control energy intensity.

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

Varminskaya Natalia Ivanovna, Ph.D., associate professor, head of the department of physics and general technical disciplines, Black Sea Higher Naval School them. P.S. Nakhimov, Sevastopol

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАХВАТА АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДЕНАВИТА – ХАРТЕНБЕРГА

Альчаков В.В., Крамарь В.А.

Аннотация. Рассматривается построение математической модели захвата антропоморфного робота SAR-400. В основу построения положены принципы метода Денавита – Хартенберга. Для заданного прототипа выполнено моделирование в пакете Matlab. Приведены основные результаты моделирования.

Ключевые слова. Математическая модель манипулятора, антропоморфный робот, робототехническая система, модель захвата.

Введение. Одним из современных направлений создания робототехнических систем является создание антропоморфных роботов (АР). Примером подобного робота является SAR-400 (антропоморфная робототехническая система) — антропоморфный робот, разработанный НПО «Андроидная техника» по заказу Роскосмоса для работы на Международной космической станции в качестве помощника космонавта (**Рис.1**). Конструкция SAR-400 позволяет расширить сферы его использования. Так, в настоящее время ведутся работы по адаптации конструкции робота и его системы управления для работы под водой.



Рис.1 – Внешний вид робота SAR-400

Отличительной особенностью данного робота является захват с пятью звеньями (в отличие от широко распространенных двухзвенных и трехзвенных), который по замыслу разработчиков должен максимально приближенно, совместно с манипулятором, имитировать руку человека в части захвата объектов различной формы (**Рис.2**).

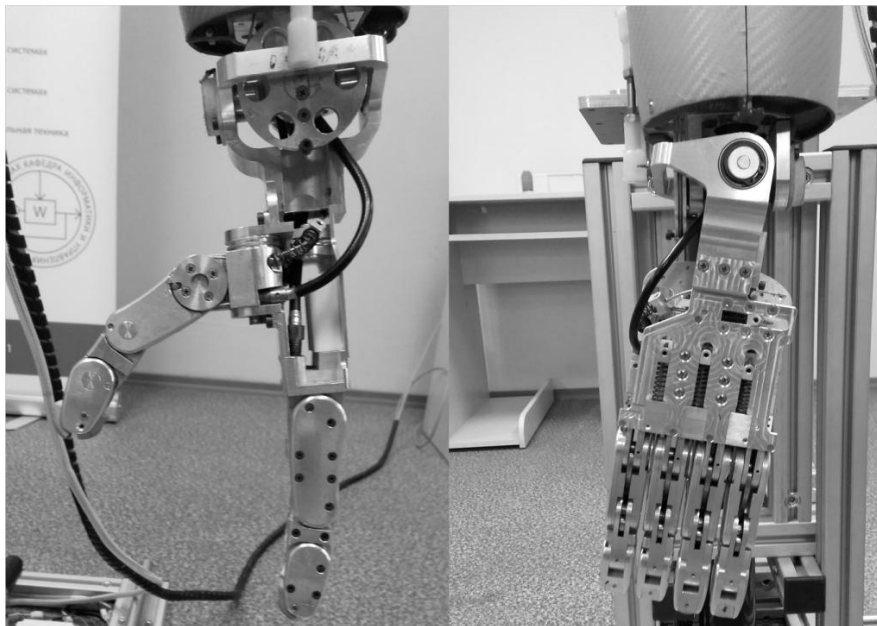


Рис.2 – Общий вид кисти AP SAR-400

Эффективные навыки манипулирования роботами в неструктурированных средах, с развитой мелкой моторикой, имеют фундаментальное значение для выполнения манипуляционных задач [1,2,3,4]. Для решения поставленной задачи необходимо иметь полную математическую модель манипулятора, на базе которой можно осуществлять построение законов управления. При построении математической модели, в работе учитывается, что захват SAR-400 имеет следующие особенности. «Безымянный палец» и «мизинец» захвата объединены, при этом управление отдельными суставами пальцев невозможно. Движения пальцев захвата осуществляются при помощи одного двигателя. Для упрощения принято, что три угла, которые описывают поворот суставов пальцев, равны между собой. Также у SAR-400 имеются предельные значения для углов поворота отдельных звеньев.

Метод Денавита – Хартенберга. Основная задача построения математической модели манипулятора с захватом заключается в определении функции положения в пространстве манипулятора и захвата. Распространенным методом для решения прямой задачи кинематики об определении положения манипулятора и захвата, является метод преобразования координат Денавита – Хартенберга последовательного построения систем координат, связанных с каждым звеном кинематической цепи (**Рис.3**).

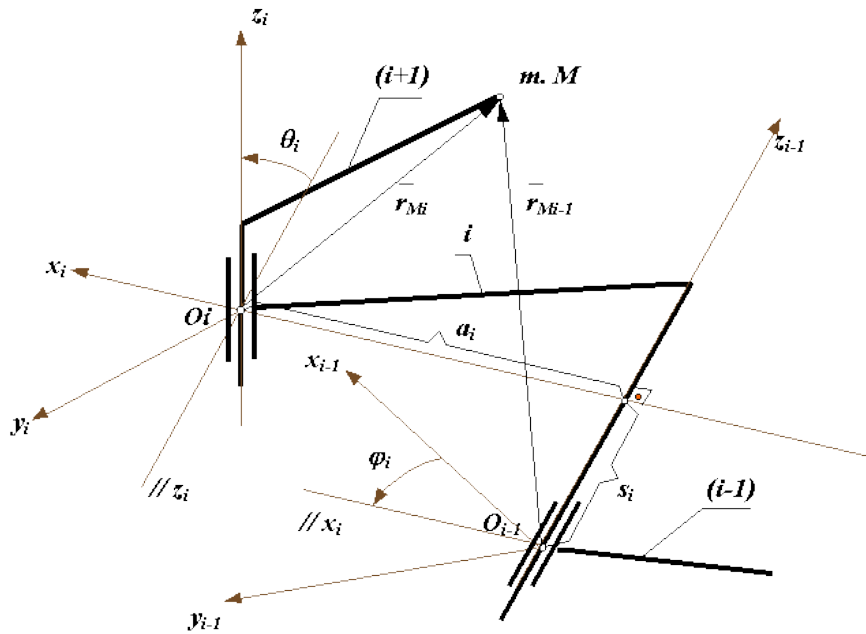


Рис.3 – Пример системы координат при последовательности четырех движений

Метод основан на формировании однородной 4×4 матрицы преобразования, описывающей положение системы координат каждого звена относительно системы координат предыдущего звена[5-9].

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & r_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & r_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где θ_i – присоединенный угол; d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $(i-1)$ -й системы координат; r_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом i -й системы координат; α_i – угловое смещение.

Заметим, что для рассматриваемого в работе SAR-400 при вращательных сочленениях параметры d_i , r_i и α_i являются постоянными. θ_i является переменная величина, изменяющаяся при вращении i -го звена относительно $(i-1)$ -го.

Алгоритм формирования систем координат звеньев подробно описан в многих публикациях, например [6-8].

Координаты p_i точки p с координатами p_{i-1} связываются при помощи матрицы преобразования (1) при помощи соотношения

$$p_i = A_i p_{i-1} \quad (2)$$

Для построения математической модели, описывающей положение захвата манипулятора SAR – 400, принято допущение, заключающееся в том,

что для данной задачи параметр α одного из звеньев принят переменным, а один из параметров θ принят постоянным.

Прямая задача кинематики. Прямая задача кинематики заключается в нахождении координат конца кинематической цепи, при заданных длинах звеньев и углах между ними. У кисти SAR-400 отсутствуют звенья, которые изменяют свою длину, поэтому все длины при описании кинематической цепи приняты постоянными. При построении модели также принято ограничение, которое состоит в одинаковом значении углов, описывающих поворот кисти робота, для каждого из пальцев.

Исходя из структуры SAR-400 видно, что звенья четырёх пальцев (указательного, среднего, безымянного и мизинца) имеют одинаковые кинематические цепи. Единственное различие в их структуре заключается в смещении пальца относительно центра захвата. На **Рис. 4** приведена общая кинематическая цепь этих пальцев.

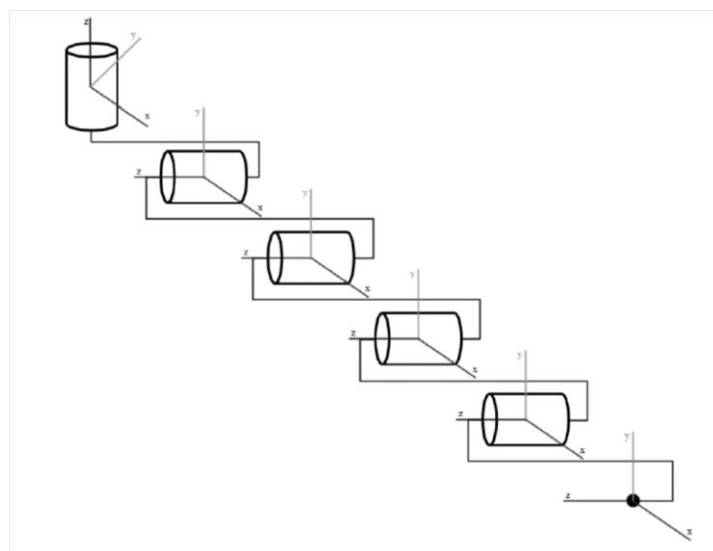


Рис.4 – Кинематическая цепь мизинца, большого, безымянного, среднего и указательного пальцев захвата

Строение большого пальца отличается от строения остальных пальцев, поэтому его кинематическая цепь будет иметь вид, представленный на **Рис. 5**.

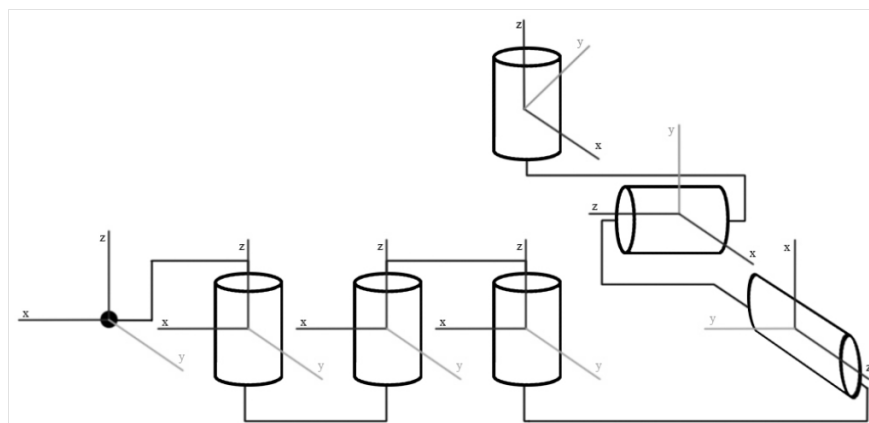


Рис.5 – Кинематическая цепь большого пальца «захвата»

Исходя из кинематической цепи мизинца, были получены параметры Денавита – Хартенберга, приведённые в **Таблице 1**. Для оставшихся трех пальцев задача решается аналогично, с учетом значения d .

Таблица 1 – Параметры Денавита – Хартенберга для мизинца

№ узла	d , м	r , м	θ	α
1	0	0	θ_1	9
2	0,0319	0,158	θ_2	0
3	0	0,038	θ_3	0
4	0	0,028	θ_4	0
5	0	0,022	θ_5	0

Матрицы преобразования для каждого из узлов имеют вид:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0,158 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0,158 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0,0319 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 A_3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0,038 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0,038 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0,028 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0,028 \sin \theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0,022 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0,022 \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перемножая матрицы преобразования, получим результирующую матрицу и формулы для описания положения пальца кисти АР SAR-400 в пространстве

$$\begin{aligned}
p_x &= 0,0158c_1c_2 - 0,028s_4(c_1c_2s_3 + c_1c_3s_2) - 0,022s_5[c_4(c_1c_2s_3 + c_1c_3s_2) - \\
&\quad - s_4(c_1s_2s_3 - c_1c_2c_3)] - 0,028c_4(c_1s_2s_3 - c_1c_2c_3) + 0,0319s_1 - \\
&\quad - 0,022c_5[s_4(c_1c_2s_3 + c_1c_3s_2) + c_4(c_1s_2s_3 - c_1c_2c_3)] - \\
&\quad - 0,038c_1s_2s_3 + 0,038c_1c_2c_3, \\
p_y &= 0,0158c_2s_1 - 0,028s_4(c_2s_1s_3 + c_3s_1s_2) - 0,022s_5[c_4(c_2s_1s_3 + c_3s_1s_2) - \\
&\quad - s_4(s_1s_2s_3 - c_2c_3s_1)] - 0,028c_4(s_1s_2s_3 - c_2c_3s_1) - 0,0319c_1 - \\
&\quad - 0,022c_5[s_4(c_2s_1s_3 + c_3s_1s_2) + c_4(s_1s_2s_3 - c_2c_3s_1)] - \\
&\quad - 0,038s_1s_2s_3 + 0,038c_2c_3s_1, \\
p_z &= 0,0158s_2 + 0,038c_2s_3 + 0,038c_3s_2 + 0,028c_4(c_2s_3 + c_3s_2) + \\
&\quad + 0,028s_4(c_2c_3 - s_2s_3) + 0,022c_5[c_4(c_2s_3 + c_3s_2) + s_4(c_2c_3 - s_2s_3)] - \\
&\quad - 0,022s_5[s_4(c_2s_3 + c_3s_2) - c_4(c_2c_3 - s_2s_3)],
\end{aligned}
\tag{4}$$

где $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$

Для решения прямой кинематической задачи параметры Денавита – Хартенберга для большого пальца захвата SAR-400 приведены в **Таблице 2**.

Таблица 2 – Параметры Денавита – Хартенберга для большого пальца кисти AP SAR-400

№ узла	d, м	r, м	θ	α
1	0	0	θ_1	90
2	0,0425	,07	θ_2	0
3	0	,025	90	0
4	0	,038	θ_4	0
5	0	,028	θ_5	0
6	0	,022	θ_6	0

Далее, строя матрицы преобразования $A_1, \dots, A_6$ для каждого узла и матрицу преобразования, как показано выше, получим формулы, описывающие положение большого пальца кисти SAR – 400 в пространстве.

Решение обратной кинематической задачи. В результате решения обратной задачи кинематики найдем углы между звеньями, при известных координатах конца кинематической цепи звеньев [7, 9]. Найдем углы, на которые нужно повернуть звенья для того, чтобы окончание пальца оказалась в заданной точке. При решении обратной задачи кинематики может возникнуть неопределенность, т.к. палец захвата SAR – 400 может попасть в одну и ту же точку пространства разными путями.

Система уравнений

$$p_{xyz}^i = f(\theta_1^i, \dots, \theta_n^i) \quad (5)$$

описывает положение окончания каждого из пальцев захвата в зависимости от значений углов θ [9]. В соотношении (5) приняты обозначения: xyz – ось, координату которой определяет уравнение; i – номер пальца захвата, координату которого определяет уравнение; n – число звеньев в данном пальце.

Так как углы θ_1 и θ_2 одинаковы для каждого из пальцев, а углы, отвечающие за поворот суставов пальцев, равны, то система нелинейных уравнений может быть записана в виде

$$\left\{ \begin{array}{l}
 p_x^5 = f_x^5(\theta_1, \theta_2, \theta_3^5), \\
 p_y^5 = f_y^5(\theta_1, \theta_2, \theta_3^5), \\
 p_z^5 = f_z^5(\theta_1, \theta_2, \theta_3^5), \\
 p_x^4 = f_x^4(\theta_1, \theta_2, \theta_3^4), \\
 p_y^4 = f_y^4(\theta_1, \theta_2, \theta_3^4), \\
 p_z^4 = f_z^4(\theta_1, \theta_2, \theta_3^4), \\
 p_x^3 = f_x^3(\theta_1, \theta_2, \theta_3^3), \\
 p_y^3 = f_y^3(\theta_1, \theta_2, \theta_3^3), \\
 p_z^3 = f_z^3(\theta_1, \theta_2, \theta_3^3), \\
 p_x^2 = f_x^2(\theta_1, \theta_2, \theta_3^2), \\
 p_y^2 = f_y^2(\theta_1, \theta_2, \theta_3^2), \\
 p_z^2 = f_z^2(\theta_1, \theta_2, \theta_3^2), \\
 p_x^1 = f_x^1(\theta_1, \theta_2, \alpha_2^1, \theta_4^1), \\
 p_y^1 = f_y^1(\theta_1, \theta_2, \alpha_2^1, \theta_4^1), \\
 p_z^1 = f_z^1(\theta_1, \theta_2, \alpha_2^1, \theta_4^1).
 \end{array} \right. \quad (6)$$

Пример графического отображения решения поставленной задачи с использованием разработанного программного обеспечения в среде Matlab приведен на **Рис. 6**.

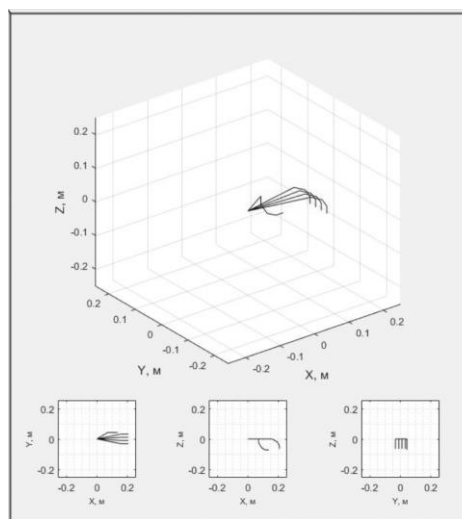


Рис.6 – Результаты моделирования текущего положения кисти манипулятора SAR-400

Выводы. Разработана математическая модель захвата робота SAR-400 на основе метода Денавита – Хартенберга. Поскольку из-за особенностей конструкции SAR-400 сделаны некоторые упрощения, разработанная математическая модель описывает захват робота с некоторой ошибкой.

В дальнейшем, после уточнения описания поведения пальцев захвата робота с математической моделью может быть стороже обновлена, и система будет работать с моделью захвата робота, которая полностью будет соответствовать человеческой руке.

Дальнейшие исследования в рамках рассматриваемого направления направлены на создание специализированной библиотеки для управления роботом-манипулятором SAR-400 в режиме реального времени. Полученная математическая модель руки робота позволяет запрограммировать реальный образец, например, через GUIMatlab, что позволит визуально анализировать адекватность разработанных алгоритмов, тестируя их на производственных задачах.

Работа выполнена в рамках реализации проекта «Разработка и исследование робототехнического комплекса для выполнения подводно-технических работ в условиях ограниченной видимости с использованием комплексной системы 3D зрения высокого разрешения»

Библиографический список

1. Furuta, K.; Kosuge, K.; Mukai, N. (1988). Control of Articulated Robot Arm with Sensory Feedback: Laser Beam Tracking System. IEEE Trans. Ind. Electron., 35, 31–39, ISSN 0278-0046
2. Munasinghe, S.R.; Nakamura, M.; Goto, S.; Kyura, N. (2001). Optimum Contouring of Industrial Robot Arms under Assigned Velocity and Torque Constraints. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part C, 31, 159–167, ISSN 1094-6977
3. Koga, M.; Kosuge, K.; Furuta, K.; Nosaki, K. (1992). Coordinated Motion Control of Robot Arms Based on the Virtual Internal Model. IEEE Trans. Robot. Autom., 8, 77–85, ISSN 1042-296X
4. Efe, M.O. (2008). Fractional Fuzzy Adaptive Sliding-Mode Control of a 2-DOF Direct-Drive Robot Arm. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B, 38, 1561–1570, ISSN 1083-4419
5. Huynh, H[oai] N[am]; Verlinden, O[livier] & Riviere -Lorphevre, E[douard] (2017). Robotic Machining Simulation using a Simplified Multibody Model, Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, pp.0885-0894, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978 -3-902734-11-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria.
6. Шаньгин, Е. С. Управление роботами и робототехническими системами : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 652000 "Мехатроника и робототехника" / Е.С. Шаньгин; Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования, Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. - Уфа : Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 2005 (Уфа : РИК УГАТУ). - 188 с

7. J.Denavit, R.S.Hartenberg, (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 23, 215–221
8. Spong, W. Mark, M.Vidyasagar (1989). Robot Dynamics and Control, John Wiley & Sons, ISBN 9780471503521, New York
9. P. I. Corke, (2007). A simple and systematic approach to assigning Denavit-Hartenberg parameters, IEEE Transactions on Robotics , vol. 23, pp. 590–594, ISSN 1552-3098

Bibliograficheskiy spisok

1. Furuta, K.; Kosuge, K.; Mukai, N. (1988). Control of Articulated Robot Arm with Sensory Feedback: Laser Beam Tracking System. IEEE Trans. Ind. Electron., 35, 31–39, ISSN 0278-0046
2. Munasinghe, S.R.; Nakamura, M.; Goto, S.; Kyura, N. (2001). Optimum Contouring of Industrial Robot Arms under Assigned Velocity and Torque Constraints. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part C, 31, 159–167, ISSN 1094-6977
3. Koga, M.; Kosuge, K.; Furuta, K.; Nosaki, K. (1992). Coordinated Motion Control of Robot Arms Based on the Virtual Internal Model. IEEE Trans. Robot. Autom., 8, 77–85, ISSN 1042-296X
4. Efe, M.O. (2008). Fractional Fuzzy Adaptive Sliding-Mode Control of a 2-DOF Direct-Drive Robot Arm. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B, 38, 1561–1570, ISSN 1083-4419
5. Huynh, H[oai] N[am]; Verlinden, O[livier] & Riviere -Lorphevre, E[douard] (2017). Robotic Machining Simulation using a Simplified Multibody Model, Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, pp.0885-0894, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978 -3-902734-11-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria.
6. Shangin, E.S. Control of robots and robotic systems: studies. manual for university students enrolled in the direction of 652000 "Mechatronics and Robotics" / E.S. Sha-ngin; Feder. Education Agency, State. educate institution of higher. prof. Education, Ufim. state Aviation tech. un-t - Ufa: Ufim. state Aviation tech. Un-t, 2005 (Ufa: RIK USATU). - 188 s.
7. J.Denavit, R.S.Hartenberg, (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 23, 215–221
8. Spong, W. Mark, M.Vidyasagar (1989). Robot Dynamics and Control, John Wiley & Sons, ISBN 9780471503521, New York
9. P. I. Corke, (2007). A simple and systematic approach to assigning Denavit-Hartenberg parameters, IEEE Transactions on Robotics , vol. 23, pp. 590–594, ISSN 1552-3098

Альчаков Василий Викторович, к-т техн. наук, alchakov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

Крамарь Вадим Александрович, д-р техн. наук, проф., vakramar@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

CONSTRUCTION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE ARM OF AN ANTHROPOMORPHIC ROBOT BASED ON THE DENAVIT-HARTENBERG METHOD

V.A. Kramar, V.V Alchakov

The construction of a mathematical model of the anthropomorphic robot SAR-400 were considered. The construction is based on the principles of the Denavit-Hartenberg method. For a given prototype, the Matlabsimulation was performed. The main results of modeling are given.

Key words: Mathematical model of the manipulator, anthropomorphic robot, robotic system, arm model

Alchakov Vasiliy Viktorovich, candidate of technical sciences, alchakov@sevsu.ru Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Kramar Vadim Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, vakramar@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ДВУХ ЭЛЕМЕНТОВ

Филипович О.В.¹

Аннотация. Рассматривается технологический процесс двухпараметрической селективной сборки двух элементов, приводятся схемы комплектования и образования многомерной селективной группы. Производится построение имитационной модели процесса комплектования и сборки элементов, оперирующей многомерными группами и позволяющей при выбранной стратегии определить суммарную вероятность получения годных сборочных комплектов, вероятность появления некомплектных элементов, образующих незавершенное производство и предварительный брак. Обсуждаются результаты моделирования и перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова. Двухпараметрическое комплектование, селективная сборка, имитационная модель.

Введение. Сопряжение элементов по нескольким параметрам нередко встречается в машиностроении и приборостроении [1...4]. Типичным примером может служить случай прецизионной сборки двух деталей, имеющих прямоугольное сечение (**Рис. 1**).

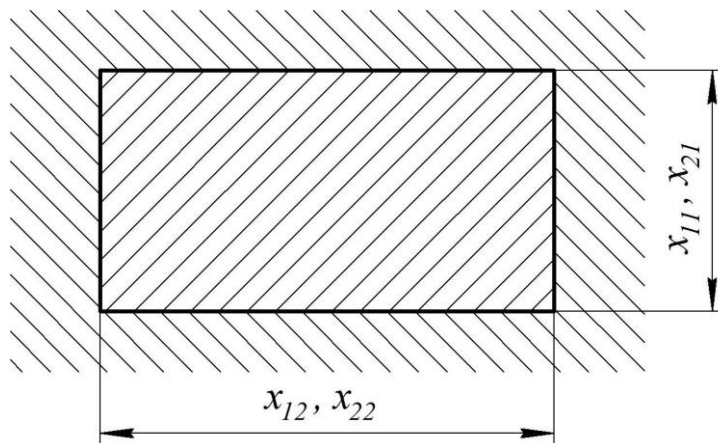


Рис. 1 – Эскиз двухпараметрического сопряжения

Рассмотрим сборку подобных элементов, каждый из которых характеризуется случайными величинами (СВ) $x_{is}, i = \overline{1, 2}, s = \overline{1, 2}$ (первый индекс – тип детали, второй – сопрягаемый параметр), схема комплектования приведена на **Рис. 2**. В данной схеме использованы условные графические обозначения, предложенные в [2]: кружок соответствует отдельному элементу, цифра в кружке – номеру элемента, каждая линия, выходящая из кружка и заканчивающаяся черточкой – одному из параметров. Объединение черточек в

группы (в данном случае – две параллельные черточки) показывает, что параметры элементов связаны условиями собираемости и качества.

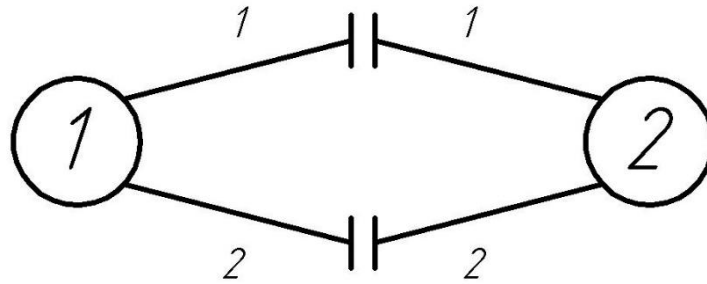


Рис. 2 – Схема двухпараметрического комплектования двух элементов

Примем, что:

- 1) элементы изготавливаются независимо друг от друга, параметры некоррелированы;
- 2) соответствующие одномерные распределения параметров изделий считаются известными и обозначаются $f_{is}(x_{is})$;
- 3) выходные параметры собранного изделия связаны со входными линейными зависимостями

$$y_s = \sum_{i=1}^2 b_{is} x_{is}, (i = \overline{1, 2}, s = \overline{1, 2}),$$

где b_{is} – известные константы.

Обобщенная модель процесса двухпараметрической селективной сборки двух элементов построена в [5].

Целью данной статьи является определение показателей процесса селективной сборки двух элементов по двум параметрам с использованием имитационного моделирования.

Интервалы допусков селективных групп отдельно для каждого из параметров элементов будем обозначать $X_i^{(k_{is})}$, где k_{is} – номер группы параметра s элемента i -го типа. Предельные отклонения a_{is} селективных групп разбивают всю область значений параметров на l_{is} интервалов $X_i^{(k_{is})}$, каждый из которых имеет границы $(a_i^{(k_{is})}; a_i^{(k_{is}+1)})$. Многомерные селективные группы с номерами $K_i = (k_{i1}, k_{i2})^T$, в пространстве параметров элементов i -го типа, образуются как прямое произведение множеств $X_i^{(k_{i1})} \times X_i^{(k_{i2})}$. Число групп по каждому параметру каждого из элементов i -го типа равно $\overline{1, l_{is}}$, общее число значений вектора K_i при этом равно $l_{i1} l_{i2}$.

В многомерную группу K_i попадают элементы i -го типа, параметры которых одновременно удовлетворяют требованиям

$$x_{i1} \in X_i^{(k_{i1})}, x_{i2} \in X_i^{(k_{i2})},$$

доля таких элементов из общего количества определяется по формуле

$$I_i^{(K_i)} = \prod_{s=1}^2 I_i^{(k_{is})}, i = \overline{1, 2}$$

где $I_i^{(k_{is})}$ – число элементов i -го типа, параметр s которых принадлежит одномерной k_{is} -й группе $X_i^{(k_{is})}$,

$$I_i^{(k_{is})} = \int_{a_i^{(k_{is})}}^{a_i^{(k_{is}+1)}} f_{is}(x_{is}) dx_{is}.$$

Тогда в группы с условными номерами 1 и l_{is} , лежащими за пределами границ допусков элементы попадают с вероятностями:

$$I_i^{(1_{is})} = \int_{-\infty}^{a_i^{(2_{is})}} f_{is}(x_{is}) dx_{is},$$

$$I_i^{(l_{is})} = \int_{a_i^{(l_{is})}}^{\infty} f_{is}(x_{is}) dx_{is}.$$

Сумма этих вероятностей составляет вероятность предварительного брака, элементы из указанных групп исключены из процесса комплектования.

Для данного случая принята одновариантная стратегия комплектования (элементы из одной группы могут входить в сборочный комплект только одного типа). Вероятность получения СК k -го типа можно определить соотношением

$$I_{CK}^{(k)} = \min \{ I_1^{(K_1)}; I_2^{(K_2)} \}, k = \overline{1, L}.$$

Суммарная вероятность получения годных СК по всем селективным группам составляет

$$I_{CK} = \sum_k I_{CK}^{(k)}.$$

Вероятность появления некомплектных элементов, образующих незавершенное производство и предварительный брак, равна

$$P_{НБ} = 1 - I_{CK}.$$

Основные принципы построения базовой модели процесса однопараметрической селективной сборки приведены в [6]. Базовая модель и ее

модификация [7] построены в среде GPSS World – современной версии системы компьютерного моделирования общего назначения GPSS [8-12].

Модель состоит из трех основных сегментов: задания исходных данных, имитации процесса измерения и сортировки, имитации процесса сборки.

В первом сегменте задается следующее:

1) количество групп сортировки, объем партий комплектующих и емкость накопителя сборки;

2) данные о сопрягаемых параметрах (расширенные допуски на изготовление, координаты середин интервалов допусков, математические ожидания, среднеквадратические отклонения, предельные отклонения, величины групповых допусков);

3) данные для определения значений выходных параметров собранного изделия и показателей процесса сборки.

Кроме этого, здесь описываются статистические таблицы, необходимых для сбора данных.

Реализацией каждой отдельно взятого элемента в модели является транзакт. Во втором сегменте производится генерация серии транзактов, при этом размер серии определяется величиной размера партии. Каждому транзакту в первый параметр записывается значение СВ x_{i1} , во второй – x_{i2} , распределенные по заданному закону. Для определения закона используются встроенные в GPSS World библиотечные генераторы случайных чисел. Третьему параметру присваивается номер многомерной селективной группы, определенной при помощи специальной процедуры при сортировке по указанному выше алгоритму. Для элементов i -го типа присваивается $(l_{i1} - 2)(l_{i2} - 2)$ номеров групп для годных и одна общая группа для бракованных, параметры которых не попали в интервал расширенного допуска. Следующие два параметра транзакта используются для промежуточных вычислений.

Процесс сортировки на заданное количество селективных групп осуществляется при помощи подпрограмм, выполненных на языке программирования низкого уровня PLUS, встроенного в GPSS World [4]. Для детали i -го типа сначала рассчитываются границы многомерной K_i -ой селективной группы в пределах расширенных допусков каждого из параметров, а затем определяется принадлежность величины x_{is} интервалам $[a_i^{(k_{is})}; a_i^{(k_{is}+1)}]$. В случае, если $x_{is} \in [a_i^{(k_{is})}; a_i^{(k_{is}+1)}]$, то процедура прекращается и результат ее выполнения возвращается в виде переменной K_i . Если этого не происходит, то процесс циклически повторяется до тех пор, пока не будет найдена принадлежность x_{is} одной из селективных групп (включая разряд бракованных).

Переменные K_i определяют группы сортировки для элементов и используются в дальнейшем в качестве номеров списков пользователя (СП), в которые попадают транзакты в порядке их поступления (FIFO: first in – first

out). Элементы остаются в СП до тех пор, пока не будет осуществлен их вывод. Данный сегмент состоит из однотипных модулей (для элементов каждого типа).

Операцию вывода осуществляет третий сегмент модели, работающий параллельно со вторым. Производится генерация специального транзакта (выводящий транзакт), во второй и третий параметры которого записываются номера определенных селективных групп, преобразованные в номера списков пользователей. Далее этот транзакт задерживается в одноканальном устройстве, которое имитирует период поиска годного комплекта. В случае, если комплект может быть собран из текущих номеров групп и в соответствующих СП есть необходимое количество транзактов, то производится их вывод из СП и поступление в накопитель сборки, который имитирует многоканальное устройство с емкостью 2 (2 разнотипных транзакта объединяются в 1 как транзакты одного семейства). Когда устройство будет заполнено, осуществляется вывод двух транзактов из него, тем самым имитируется процесс сборки.

Далее производится расчет показателей сборочного процесса (для расчета используются истинные значения параметров) и выходных параметров. Если последние лежат в заданных пределах, значит сортировка осуществлена правильно и комплект является годным, если нет – бракованным. Сборка комплекта производится в любом случае.

Если комплект не может быть собран из текущих номеров групп, то процесс циклически повторяется путем инкрементирования значения, записанного в первый параметр выводящего транзакта. Процесс вывода осуществляется до тех пор, пока в накопителях, соответствующих каждой паре элементов, определенной селективной группы есть контрэlementы. Оставшиеся элементы будут составлять незавершенное производство.

После прогона модели в отчете представлены следующие данные, необходимые для дальнейшего анализа:

1) информация о статистических плотностях распределения, средних значениях и стандартных отклонениях параметров элементов в партии, выходных параметрах изделия, собранная при помощи статистических таблиц;

2) количество транзактов, оставшихся в пользовательских списках, составляющих незавершенное производство и предварительный брак;

3) общее количество собранных комплектов и годных собранных комплектов.

Приведем пример моделирования процесса селективного комплектования и сборки по построенной имитационной модели. Пусть изготавливаются партии элементов одинаковых объемов $Q = 1000$ шт. В данном примере под элементом будем понимать деталь, имеющую прямоугольную форму в сечении и соответствующие размеры (**Рис. 1**). Предположим, что распределения размеров деталей в соответствующих партиях – нормальные, имеющие плотности

$$f_{is}(x) = \frac{1}{\sigma_{is} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_{is})^2}{2\sigma_{is}^2}}, \quad (i = \overline{1, 2}, s = \overline{1, 2}),$$

где m_{is} и σ_{is} – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение СВ x_{is} . Схемы расположения интервалов допусков каждого параметра с границами селективных групп показаны на **Рис. 3**.

Для рассматриваемого примера в качестве исходных данных примем следующее.

1. Параметры распределений СВ:

– математические ожидания $m_{11}=4,0$ мм; $m_{12}=10,5$ мм; $m_{21}=2,0$ мм; $m_{12}=5,5$ мм;

– среднее квадратические отклонения $\sigma_{11}=1,525$ мм; $\sigma_{12}=3,390$ мм; $\sigma_{21}=1,475$ мм; $\sigma_{22}=3,279$ мм.

2. Выходными параметрами изделия являются зазоры в соединениях, которые должны лежать в заданных диапазонах:

$$S_1 = x_{11} - x_{21} \in [0; 0,006] \text{ мм}; S_2 = x_{12} - x_{22} \in [0; 0,008] \text{ мм}.$$

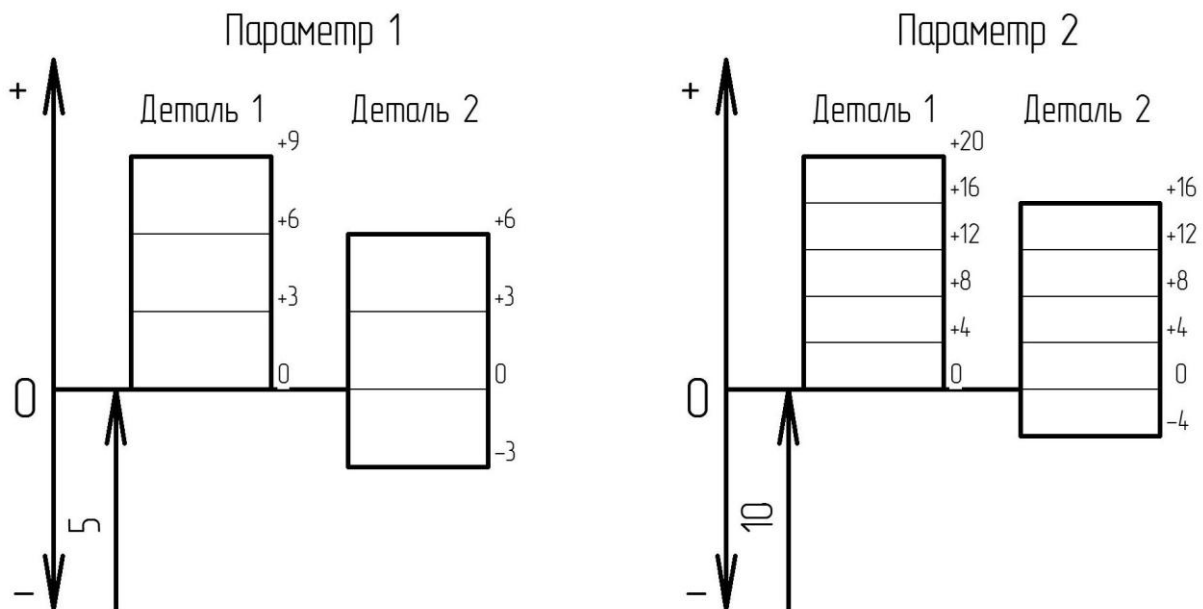


Рис. 3 – Схемы расположения интервалов допусков

После прогона модели с использованием одного генератора случайных чисел по накопленным данным возможно получить статистическое распределение значений размеров каждой детали (**Рис. 4**), а также гистограммы, показывающие статистические распределения значений зазоров (**Рис. 5,6**).

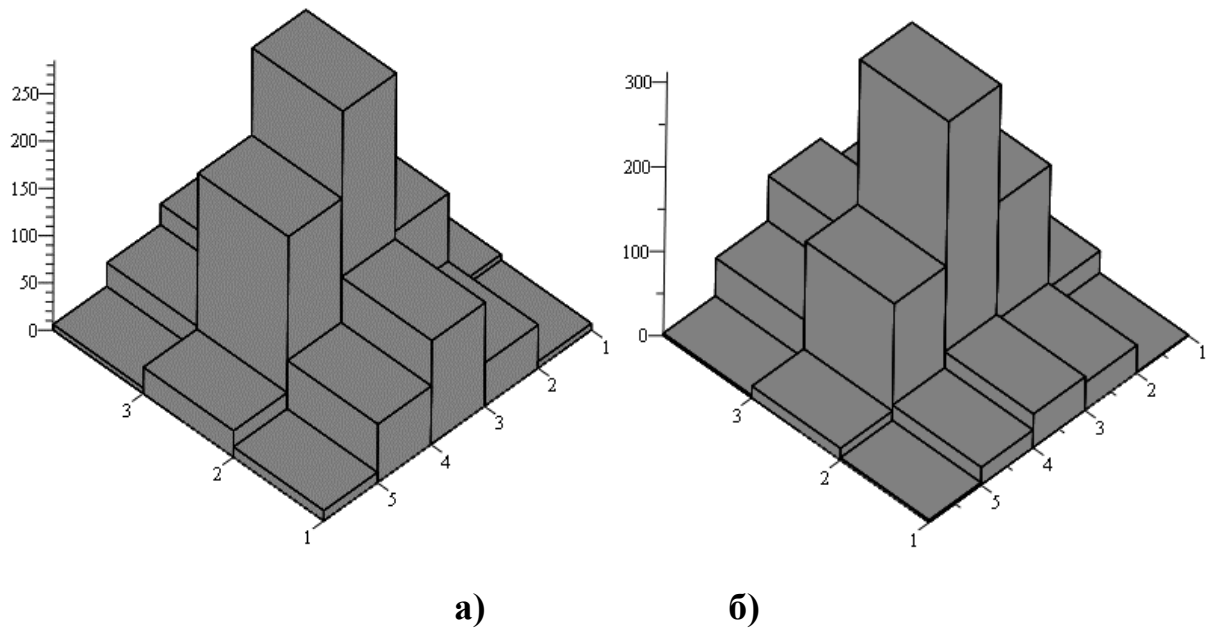


Рис. 4 – Распределение размеров по многомерным группам:

а) деталей типа 1; б) деталей типа 2

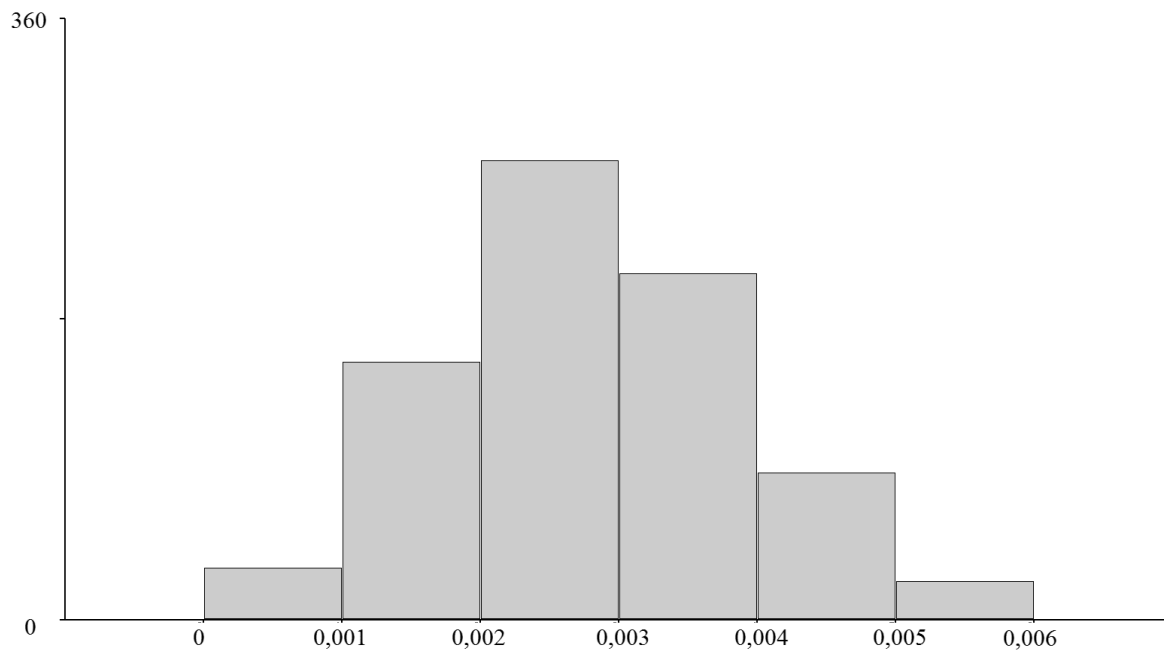


Рис. 5 – Статистическое распределение значений зазора S_1

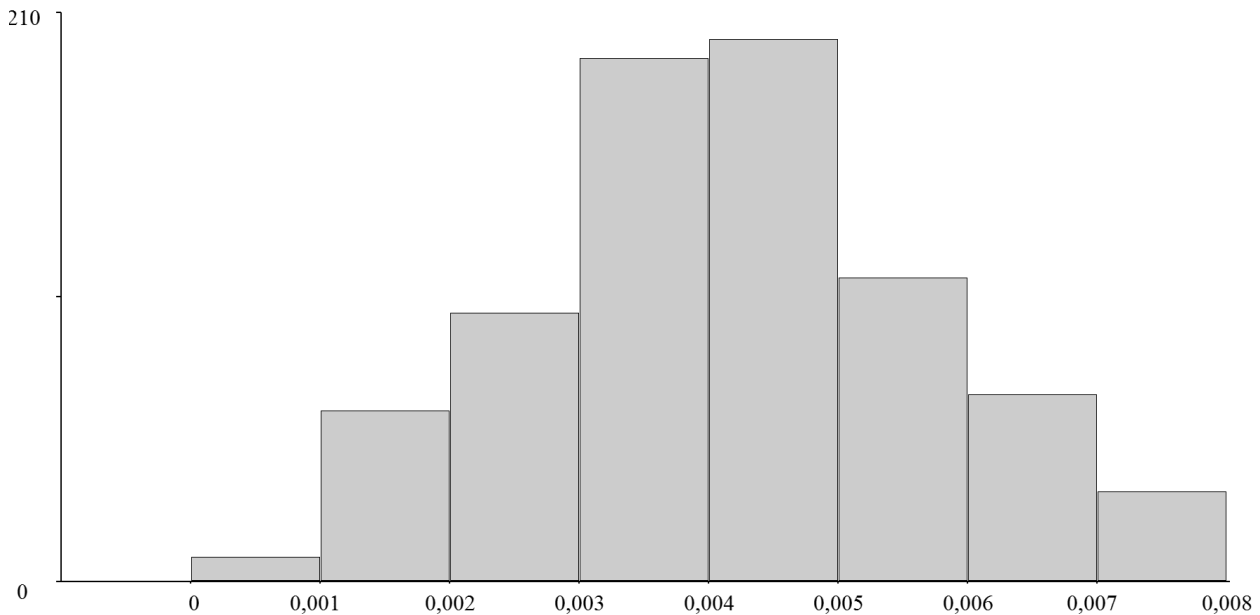


Рис. 6 – Статистическое распределение значений зазора S_2

Показатели сборочного процесса после одного прогона модели: количество годных сборочных комплектов 778 ($I_{СК} = 0,78$), бракованных деталей первого типа – 12, второго типа – 8, незавершенное производство 210 и 214 деталей каждого типа соответственно.

Построенная модель может использоваться в дальнейшем для моделирования процесса многопараметрической селективной сборки двух элементов, расчета показателей, анализа и управления технологическим процессом.

Дальнейшими исследованиями в этой области является модернизация построенной модели с учетом влияния погрешностей средств измерения на распределение деталей по селективным группам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта №18-48-920014.

Библиографический список

1. Коганов И.А. Оптимизация подбора деталей, сопрягаемых при сборке по большому количеству поверхностей /И.А. Коганов //Прогрессивная технология машиностроения. Вып.3. – Тула: Изд-во ТПИ, 1968. – С.17-19.
2. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки /В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
3. Сердобинцев Ю.П. Оптимизированный выбор сборочных комплектов при многовариантных схемах размерного комплектования /Ю.П. Сердобинцев, Л.А. Рабинович, А.В. Савичев //Известия Волгоградского государственного технического университета, 2006. – №3. – С. 37-39.
4. Буловский П.И. Автоматизация селективной сборки приборов /П.И. Буловский, Г.В. Крылов, В.А. Лопухин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1978. – 232с.

5. Филипович О.В. Модель двухпараметрической селективной сборки двух элементов /О.В. Филипович //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Изд-во ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», 2018. – Т.2. – №4(330). – С. 173-178.
6. Филипович О.В. Имитационная модель процесса однопараметрической селективной сборки /О.В. Филипович, В.Я. Копп, М.И. Гарматюк //Сборка в машиностроении и приборостроении. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2012. – №5. – С.81-90.
7. Филипович О.В. Оценка влияния погрешности измерения на показатели селективной сборки с помощью имитационного моделирования /О.В. Филипович, Г.В. Невар //Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 9-1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 428-437.
8. Боев В.Д. Моделирование систем, инструментальные средства GPSS World /В.Д. Боев. – Санкт-Петербург: Изд-во «БХВ-Петербург», 2004. – 454 с.
9. Бражник А.Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS World /А.Н. Бражник. – Санкт-Петербург: Реноме, 2006. – 439 с.
10. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем /Е.М. Кудрявцев. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
11. Рыжиков Ю.И. Оценки системы моделирования GPSS World /Ю.И. Рыжиков //Информационно-управляющие системы, 2003. №2-3. – С.30-38.
12. Боев В.Д. Об адекватности систем имитационного моделирования GPSS World и AnyLogic /В.Д. Боев //Прикладная информатика, 2010. №6 (30). С.69-82.

Bibliograficheskiy spisok

1. Koganov I.A. Optimizaciya podbora detalej, sopryagaemyh pri sborke po bol'shому количеству poverhnostej /I.A. Koganov //Progressivnaya tekhnologiya mashinostroeniya. Vyp.3. – Tula: Izd-vo TPI, 1968. – S.17-19.
2. Katkovnik V.YA. Osnovy teorii selektivnoj sborki /V.YA. Katkovnik, A.I. Savchenko. – L.: Politehnika, 1991. – 303 s.
3. Serdobincev YU.P. Optimizirovannyj vybor sborochnyh komplektov pri mnogovariantnyh skhemah razmernogo komplektovaniya /YU.P. Serdobincev, L.A. Rabinovich, A.V. Savichev //Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006. - №3. - S. 37-39.
4. Bulovskij P.I. Avtomatizaciya selektivnoj sborki priborov /P.I. Bulovskij, G.V. Krylov, V.A. Lopuhin. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1978. – 232s.
5. Filipovich O.V. Model' dvuhparametricheskoj selektivnoj sborki dvuh ehlementov /O.V. Filipovich //Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: Izd-vo FGBOU VO «Orlovskij gosudarstvennyj universitet imeni I.S. Turgeneva», 2018. – Т.2. – №4(330). – S. 173-178.
6. Filipovich O.V. Imitacionnaya model' processa odnoparametricheskoj selektivnoj sborki /O.V. Filipovich, V.YA. Kopp, M.I. Garmatyuk //Sborka v mashinostroenii i priborostroenii. – M.: Izd-vo «Mashinostroenie», 2012. - №5. – S.81-90.

7. Filipovich O.V. Ocenka vliyaniya pogreshnosti izmereniya na pokazateli selektivnoy sborki s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya /O.V. Filipovich, G.V. Nevar //Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 9-1. - Tula: Izd-vo TulGU, 2017.- S. 428-437.
8. Boev V.D. Modelirovanie sistem, instrumental'nye sredstva GPSS World /V.D. Boev. – Sankt-Peterburg: Izd-vo «BHV-Peterburg», 2004. – 454 s.
9. Brazhnik A.N. Imitacionnoe modelirovanie: vozmozhnosti GPSS World /A.N. Brazhnik. – Sankt-Peterburg: Renome, 2006. – 439 s.
10. Kudryavcev E.M. GPSS World. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem /E.M. Kudryavcev. – M.: DMK Press, 2004. – 320 s.
11. Ryzhikov YU.I. Ocenki sistemy modelirovaniya GPSS World /YU.I. Ryzhikov //Informacionno-upravlyayushchie sistemy, 2003. №2-3. – S.30-38.
12. Boev V.D. Ob adekvatnosti sistem imitacionnogo modelirovaniya GPSS World i AnyLogic /V.D. Boev //Prikladnaya informatika, 2010. №6 (30). S.69-82.

Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, ophis1@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

SIMULATION MODEL OF TWO-PARAMETER SELECTIVE ASSEMBLY OF TWO ELEMENTS

Filipovich O.V.

Annotation. The technological process of two-parameter selective assembly of two elements is considered, the scheme of completion and the scheme of formation of a multidimensional selective group is given. The construction of a simulation model of the process of completion and assembly of elements, operating in multidimensional groups and allowing for the selected strategy to determine the total probability of obtaining accepted assembled sets, the probability of incomplete elements, forming work in progress and preliminary scrappage. The results of modeling and prospects for further research are presented.

Keywords. Two-parameter completion, selective assembly, simulation model.

Filipovich Oleg Viktorovich, Ph.D., Associate Professor, Head of Department, Russian Federation, Sevastopol, Sevastopol State University

УДК 681.518

ОБРАБОТКА ПОКАЗАНИЙ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЕГО ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

Скатков И.А.¹, Заморёнова Д.В.¹

Аннотация. В статье описываются погрешности, возникающие при обработке измерительного сигнала индуктивного датчика перемещения на основе детектирования и последующего аналого-цифрового преобразования, и способы устранения указанных погрешностей на основе измерения временных параметров сигнала. Приведена функциональная схема такой обработки с помощью таймера микроконтроллера, работающего в режиме захвата.

Ключевые слова. Измерительные устройства, индуктивный датчик, погрешности измерения, обработка аналогового сигнала.

Введение. Известно, что современное прецизионное металлообрабатывающее оборудование может обеспечить обработку линейных размеров деталей с относительной погрешностью до 10^{-6} .

Однако, при проведении автоматизированных измерений возникают проблемы, связанные с разработкой датчиков и измерительных устройств, обеспечивающих такие высокие точности. Эти проблемы связаны, во-первых, со значительной длительностью переходных процессов, возникающих при преобразовании сигналов, поступающих с датчиков, во-вторых, с погрешностями, возникающими при преобразовании сигнала.

При измерении геометрических параметров с помощью индуктивных или емкостных датчиков обычно используется характерная схема обработки сигнала, вырабатываемого датчиком (Рис.1).

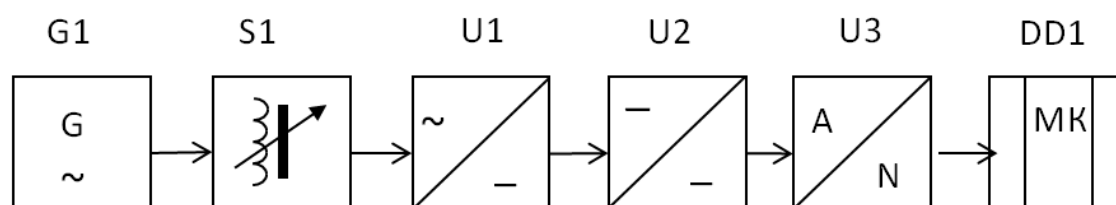


Рис.1 – Функциональная схема обработки сигнала индуктивного датчика

На рисунке обозначены: G1 – генератор синусоидального напряжения; S1 – индуктивный датчик; U1 – преобразователь переменного напряжения в постоянное; U2 – масштабирующий усилитель; U3 – аналогово-цифровой преобразователь; DD1 – микроконтроллер; G2 – тактовый генератор микроконтроллера;

Под воздействием измерительного наконечника, соединенного с сердечником индуктивного датчика или обкладки конденсатора емкостного датчика, меняется его импеданс. Датчик является одним из элементов делителя напряжения либо измерительного моста, на который подается переменное напряжение от генератора синусоидального напряжения; напряжение преобразуется в постоянное. Полученное постоянное напряжение масштабируется и сдвигается для соответствия необходимому входному диапазону АЦП. АЦП может быть различных типов, но общим принципом его работы является многократное сравнение сформированного измерительного аналогового сигнала с источником опорного напряжения. Создание источника опорного напряжения с малой погрешностью является сложной технической задачей [1].

Обработка сигнала с измерительного датчика имеет множество недостатков.

Изменение импеданса датчика вследствие изменения индуктивности или емкости датчика носит нелинейный характер из-за наличия в схеме других элементов, имеющих активное либо реактивное сопротивление. Эта нелинейность трудно учитывать, поскольку часть элементов, влияющих на нелинейность, носит паразитный характер.

Выходное напряжение датчика зависит от параметров питающего переменного напряжения, которое должно быть стабильно по частоте и амплитуде и не иметь дополнительных спектральных составляющих. Создание генератора такого напряжения является сложной схемотехнической задачей, и во многом зависит от качества примененных элементов. Например, генератор на мосте Вина в идеальном случае вырабатывает неискаженный синусоидальный сигнал, однако такой генератор требует точного соответствия элементов фазосдвигающих цепочек. Генератор на мосте Вина не стабилизирует амплитуду вырабатываемого синусоидального напряжения. Кроме точного совпадения номиналов элементов фазосдвигающих цепочек, также требуется совпадение их температурных коэффициентов.

Точное преобразование переменного напряжения в постоянное такой-же амплитуды связано с внесением погрешности в измерительный сигнал, т.к. для решения этой задачи используются нелинейные элементы. Повышение точности выпрямления, например применение синхронных детекторов, приводит к значительному усложнению схемотехники. Пример такого устройства приведен в [2,3].

Масштабирование измерительного сигнала с малыми искажениями связано с применением прецизионных операционных усилителей и высокоточных резисторов в цепях обратной связи. Кроме того, если требуется сдвиг уровня сигнала, то необходим дополнительно точный источник опорного напряжения.

Искажения АЦП вызваны погрешностью источника опорного напряжения, ненулевой пороговой чувствительностью, задержкой передачи сигнала компараторов и возможным изменением преобразуемого сигнала во

время преобразования. На практике разрешение АЦП ограничено отношением сигнал/шум входного сигнала. При большой интенсивности шумов на входе АЦП различение соседних уровней входного сигнала становится невозможным, то есть ухудшается разрешающая способность. При этом реально достижимое разрешение описывается эффективной разрядностью, которая меньше, чем реальная разрядность АЦП. При преобразовании сильно зашумлённого сигнала младшие разряды выходного кода практически бесполезны, так как содержат шум. Поэтому в основном применяются восьми – десятиразрядные АЦП.

Выводы. Проанализировав недостатки обработки измерительного сигнала по схеме, указанной на **Рис.1**, авторы пришли к выводу, что в основном, их причиной является аналоговая обработка сигнала на всех этапах его преобразования. При этом на всех этапах преобразования сигнала основным информативным параметром является амплитуда сигнала. Этот параметр очень чувствителен к различного рода шумам и помехам.

В [4] указано на возможность преобразования сигнала от датчика, измерения временных параметров электрического сигнала; однако в [5] проведен обширный анализ имеющихся схем подключения датчиков, из которого можно сделать вывод, что на сегодняшний день основным способом обработки сигнала от датчика является измерение отклонения амплитуды сигнала, вызванное изменением импеданса датчика. При этом существует множество решений [5], направленных на повышение точности таких измерений (применение дифференциальных датчиков, использование мостовых схем, синхронных детекторов и прочее). Однако, применив схему, показанную на **Рис.2**, можно значительно упростить обработку сигнала датчика, и отказаться от множества элементов, вносящих дополнительные погрешности.

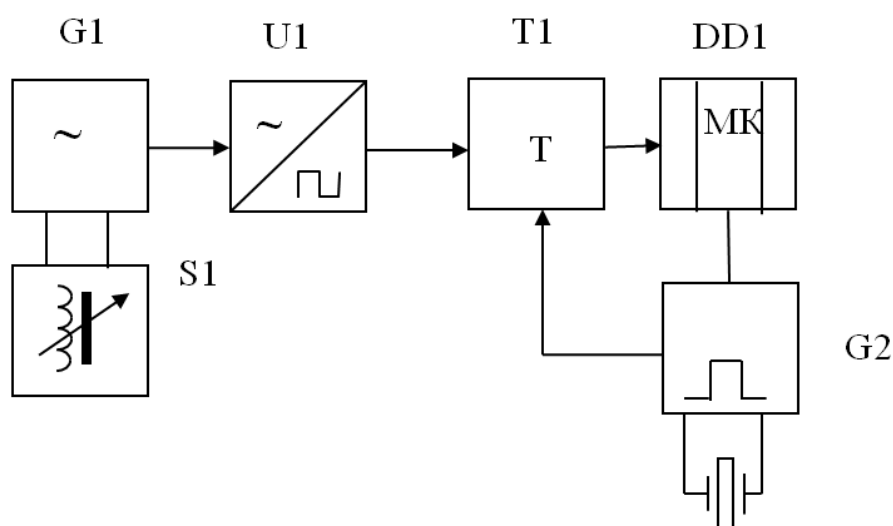


Рис.2 - Функциональная схема обработки сигнала индуктивного датчика измерением периода синусоидального сигнала

На схеме обозначены: S1 – индуктивный датчик; G1 – генератор синусоидального напряжения; U1 – пороговый элемент; T1 – таймер; DD1 – микроконтроллер; G2 – тактовый генератор микроконтроллера;

Индуктивный датчик – частотоподающий элемент генератора синусоидального напряжения. Синусоидальное напряжение поступает на пороговый элемент, в качестве которого обычно используется детектор нуля, выполненный на триггере Шмитта. Таймер обычно входит в состав микроконтроллера и синхронизируется от тактового генератора.

В схеме на **Рис.2** отсутствуют многие элементы из схемы на **Рис.1**, имеющие высокие составляющие погрешности.

Основные составляющие погрешностей: дрейф параметров индуктивного датчика, который легко устраняется начальной настройкой; точность срабатывания порогового элемента; уход частоты тактового генератора, погрешностью квантования. Точность срабатывания порогового элемента при применении современных прецизионных операционных усилителей может быть достаточно высокой. Частота тактового генератора стабилизирована кварцем, поэтому уход частоты незначителен, особенно при термостатировании кварца.

Для измерения периода сигнала удобно использовать таймер в режиме захвата [6,7]. Таймер работает в режиме счета тактовых импульсов, и каждый положительный фронт импульса на входе микроконтроллера пересылает данные из счетного регистра таймера в специальный внутренний регистр, а при необходимости счетный регистр таймера обнуляется.

Библиографический список

- 1.Смородинов А. Источники опорного напряжения: основные параметры и принципы проектирования / А. Смородинов // Компоненты и технологии – 2015. – №9. – с. 100–102.
- 2.Галочкин В.А. Устройства приема и обработки сигналов. Самара: ФГОБУ ВПО ПГУТИ, 2015г - 425 с.
- 3.Смирнов В.И. Методы и средства функциональной диагностики и контроля технологических процессов на основе электромагнитных датчиков. Ульяновск: УлГТУ, 2001,-190 с.
- 4.Грачев А. В. Анализ погрешностей измерительной схемы преобразователей параметров индуктивного датчика / А. В. Грачев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль – 2018 №3(25). с 79-85
- 5.Федотов, А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля: – Омск: ОмГТУ, 2011. – 176 с.
- 6.Матюшов Н.В. Начало работы с микроконтроллерами STM8. М.: СОЛОН-Пресс, 2016. — 208 с.
- 7.Иванов Ю.И., Ягай В.Я. Микропроцессорные устройства систем управления: Учебное пособие. Таганрог: ТРТУ, 2005. – 133с.

Bibliograficheskiy spisok

- 1.Smorodinov A. Istochniki opornogo napryazheniya: osnovnyye parametry i printsipty proyektirovaniya / A. Smorodinov // Komponenty i tekhnologii - 2015. - №9. – S. 100-102.

2. Galochkin V.A. *Ustroystva priyema i obrabotki signalov*- Samara: FGOBU VPO PGUTI, 2015g. – 425 s.
3. Smirnov V.I. *Metody i sredstva funktsional'noy diagnostiki i kontrolya tekhnologicheskikh protsessov na osnove elektromagnitnykh datchikov*. Ul'yansky: UlGTU, 2001. – 190 s.
4. Grachev A.V. *Analiz pogreshnostey izmeritel'noy shemy preobrazovateley parametrov induktivnogo datchika* / A.V. Grachev // *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* – 2018 №3(25). S 79-85
5. Fedotov, A.V. *Teoriya i raschet induktivnykh datchikov peremeshcheniy dlya sistem avtomaticheskogo kontrolya*: - Omsk: OmGTU, 2011. – 176 s.
6. Matyushov N.V. *Nachalo raboty s mikrokontrollerami STM8*, M .: SOLON-Press, 2016. – 208 s.
7. Ivanov U.I., Yagay V.Y. *Microprocessornye ustroystva sistem upravleniya: ushebnoe posobie*. Taganrog: TRTU, 2005.- 133s.

Скатков Иван Александрович, канд. техн. наук, доц., skatkov@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

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

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-48-920014.

PROCESSING OF INDUCTIVE MOTION SENSOR INDICATIONS, WITH BASED ON MEASURING ITS OF OUTPUT SIGNAL TIME PARAMETERS.

I. A. Skatkov, D. V. Zamoryonova

This article describe the errors that occur when processing the measuring signal of an inductive displacement sensor based on detection and subsequent analog-digital conversion, and ways to eliminate these errors based on the measurement of the signal time parameters. A functional diagram of such processing using a microcontroller timer operating in capture mode is given.

Key words: measuring devices, inductive sensor, measurement errors, analog signal processing.

Skatkov Ivan Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, skatkov@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University ,

Zamoryonova Darya Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, zamik@ukr.net, Russia, Tula, Sevastopol State University.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №1(5) 2019 г.

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-mashinopriboroostroenii>

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательство БГТУ.

Публикуемые материалы прошли 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: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Российская Федерация, Севастополь, ул. Университетская 33. № рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт.2018 г.

Издатель:

1. ФГАОУ ВО Российская Федерация, «Брянский государственный технический университет», 241035, г. Брянск, бул.50 лет Октября, 7;

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

Брянск 2019 г.