

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№2(10)
2020

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

Выходит 4 раза в год

ISSN 2658-4727

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО- ПРИБОРОСТРОЕНИИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Севастополь, 2020

Главный редактор

Копп В.Я., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Заместитель главного

редактора

Филипович О.В., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Научный редактор

Бохонский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Ответственный секретарь

Майстришин М.М., к.т.н.

(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Пашков Е.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Краснодубец Л.А., д.т.н.,

проф.

(г. Севастополь)

Скатков А.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Песчанский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Рзаев Р.Р., д.т.н., проф.

(г. Баку)

Прейс В.В., д.т.н., проф.

(г. Тула)

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)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

- Бохонский А.И., Майстришин М.М., Рыжков А.И.** Экспериментальная проверка оптимального вращения упругого стержня 3
- Вартанов М.В., Петров В.К., Зинина И.Н., Нгуен Ван Зунг, Чан Динь Ван** Идентификация положения детали с помощью силомоментного датчика в сборочных операциях типа «вал-втулка» при двухточечном контакте с учетом трения 17
- Токарев Д.А., Кабанов А.А.** Анализ критических состояний манипуляторов при согласованной работе 27

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Обжерин Ю.Е., Сидоров С.М., Никитин М.М.** Производительность технологической ячейки с мгновенно пополняемым резервом времени без прекращения обработки 39
- Рапацкий Ю.Л., Копп В.Я., Липка В.М.** Исследование механосборочного производства с применением методов экспертных оценок и анализа 51
- Крамаренко А.С., Крамарь В.А., Липко И.Ю.** Метод снижения количества данных для обучения роботов 68
- Мехтиев Т.З.** Нечёткое моделирование временных рядов для прогнозирования состояний технических систем 75

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Денисов М.С.** Разработка контрольно-измерительной системы для управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл 86

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Кабанов А.А., Крамарь В.А., Крамарь О.А.** Кинематическая схема управления хирургическим роботом 95

УДК 65.661.56:621.65.8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОПТИМАЛЬНОГО
ВРАЩЕНИЯ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ**

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

Аннотация. С использованием робота (Mitsubishi Robot RV-1A) в лаборатории кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» выполнена проверка оптимальных вращений вокруг неподвижной оси (на заданный угол, за приемлемое минимально возможное время) упругого консольного стержня с распределенной массой по длине из исходного в конечное состояние абсолютного покоя. Результаты практической реализации кососимметричного управления (углового ускорения типа «разгон-торможение») в достаточной степени согласуются с теоретическим моделированием динамики упругого объекта при оптимальном переносном вращательном движении вокруг оси, проходящей через конец упругого стержня.

Ключевые слова. Оптимальное управление (угловое ускорение), упругий стержень (конечной жесткости), экспериментальная проверка, манипулятор, устранение колебаний объекта.

Введение. Теории оптимального управления движением объектов как абсолютно твердых тел и систем посвящены работы [1 – 6]. Решение актуальных задач оптимального управления колебаниями упругих систем приведено в известных работах [7 – 10].

Продолжают оставаться актуальными для современной техники исследования оптимальных управлений переносным поступательным и вращательным движениям упругих систем с сосредоточенными и распределенными массами [11 – 15]. С использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления (реверсинное исчисление) в работе [14] указан широкий класс кососимметричных управлений, обеспечивающих достаточно быстрые перемещения упругих систем из исходного состояния абсолютного покоя в конечное состояние абсолютного покоя (за минимальное время). Однако, и до настоящего времени известно ограниченное число экспериментальных исследований, подтверждающих возможность практического применения такого типа управлений движением объектов конечной жесткости.

В случае оптимального поступательного перемещения упругого объекта в настоящее время известно достаточно хорошее согласование теории и эксперимента.

Цель исследований – анализ результатов реализации быстрого поворота вокруг неподвижной оси консольного упругого стержня на заданный угол из исходного в конечное состояние покоя.

Этапы экспериментального исследования включают: формирование и применение оптимальных управлений – релейного и эквивалентного гармонического; статистическая обработка результатов измерений; сопоставление теоретических и экспериментальных кинематических параметров движения; выводы об эффективности практического применения предложенных управлений.

1. Конструирование оптимального управляющего воздействия

Релейное управление. Наиболее просто описание релейного управления возможно с использованием метода припасовывания. Функция $\varepsilon_e(t)$, разбитая на два участка, изображена на **Рис.1**. На первом – при движении из состояния покоя $\varphi_e(0)=0$, $\omega_e(0)=0$ для уравнения $\frac{d^2\varphi_e}{dt^2}=\varepsilon_0$ следует:

$$\varphi_e(t) = \frac{\varepsilon_0 t^2}{2}, \quad \omega_e(t) = \varepsilon_0 t \quad (1)$$

На втором участке при найденных для него начальных условиях ($t=T/2$) движение описывается зависимостями:

$$\varphi_e(t) = \frac{\varepsilon_0 T^2}{8} + \frac{\varepsilon_0 T}{2}t - \frac{\varepsilon_0 t^2}{2}, \quad \omega_e(t) = \frac{\varepsilon_0 T}{2} - \varepsilon_0 t, \quad (2)$$

где теперь время начинается с нуля ($T/2 > t > 0$).

Из условий поворота стержня на угол $\pi/2$ получено $\varepsilon_0 = \frac{2\pi}{T^2}$. При реализации такого движения максимальное угловое ускорение обратно пропорционально квадрату общего времени движения. Итак, строгое релейное управление обеспечивает движение объекта (без учета сопротивления) из исходного состояния переносного покоя в конечное состояние покоя.

Релейное управление, заданное аналитически

При релейном управлении для описания углового ускорения использована функция Хевисайда:

$$\varepsilon_e(t) = \varepsilon_0 \left(H(t) - 2H\left(t - \frac{T}{2}\right) + H(t - T) \right), \quad (3)$$

здесь $H = Heviside$. Интегрирование функции (3) позволяет получить выражения для угловой скорости и угла поворота.

Графики $\varepsilon_e(t)$, $\varphi_e(t)$, $\omega_e(t)$ при $T > t > 0$ изображены на **Рис.1**.

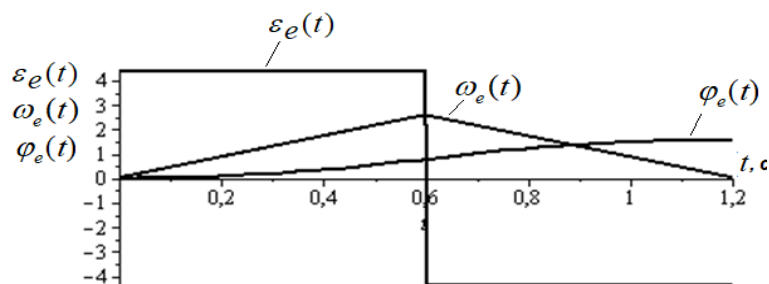


Рис.1 – Графики переносного вращательного движения:
 ускорение $\varepsilon_e(t)$, угловая скорость $\omega_e(t)$, угол поворота $\varphi_e(t)$

Максимальное (теоретическое) значение угловой скорости

$$\omega_{e_max} = \frac{E_0 T}{2} = 2,61 \text{ с}^{-1}.$$

При учете только первой моды колебаний движения конца упругой консоли описывается обыкновенным дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 W_1(t)}{dt^2} + k^2 W_1(t) = -\varepsilon_e(t) \cdot L, \quad (4)$$

где k – частота первого тона колебаний стержня как системы с одной степенью свободы. Исходные данные для определения частоты первого тона колебаний: $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости; $J = \frac{\pi d^4}{64}$ – осевой момент

инерции; $d = 0,005$ м – диаметр стержня, $m_0 = \frac{\pi d^2}{4} L \gamma$ – масса стержня; $L = 1,05$ м – длина консоли; $\gamma = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность материала;

$$k = (1,875)^2 \sqrt{\frac{EJ}{m L^4}} = 20,682 \text{ с}^{-1}.$$

Для принятых исходных данных в случае идеального релейного управления, без учета линейно-вязкого сопротивления, при движении из состояния покоя, графики относительного перемещения, скорости и ускорения изображены на **Рис.2**, а графики абсолютного движения конца стержня, как суммы переносного и относительного ($\varepsilon_e(t) \cdot L + \ddot{W}_1(t)$), приведены на **Рис.3**.

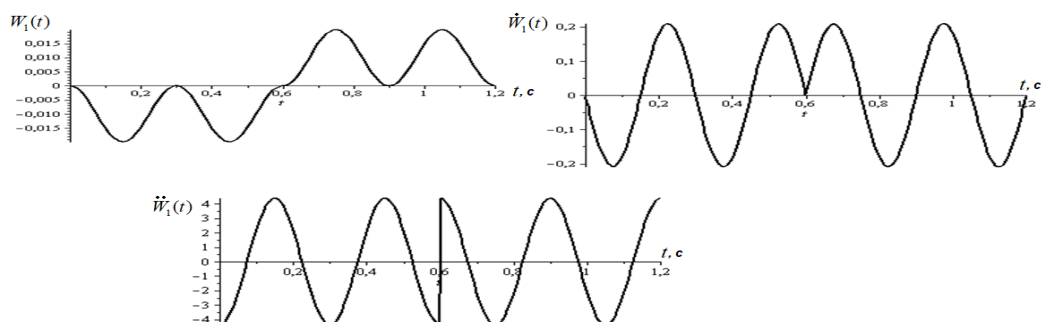


Рис.2 – Графики относительного движения конца стержня: а)
 перемещение $W_1(t)$; скорость $\dot{W}_1(t)$; ускорение $\ddot{W}_1(t)$

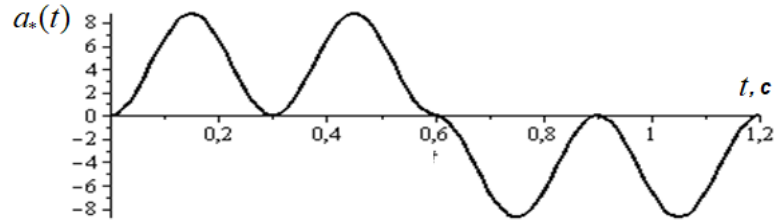


Рис.3 – График абсолютного ускорения конца стержня

$$a_*(t) = \varepsilon_e(t) \cdot L + \ddot{W}_1$$

Естественно предположить, что теоретические значения перемещения, скорости и ускорения больше, чем экспериментальные.

Экспериментальный стенд. Методика проведения эксперимента

Цель эксперимента – проверка модели динамического поведения объекта в виде упругого консольного стержня с распределенной массой по длине при оптимальных переносных вращательных угловых ускорениях (управлениях) в виде релейной и эквивалентной синусоидальной функций.

Использование оптимальных управлений манипуляторами с элементами конечной жесткости, реализующими технологические операции в промышленности, в т.ч. в аддитивном производстве, является актуальной задачей. В процессе реализации быстрых перемещений упругих систем, как известно, возникают колебания, влияющие на качество создаваемого изделия. Необходимы такие управления, которые без снижения производительности обеспечивали бы точность и качество работы.

Экспериментальная установка принята на базе робота Mitsubishi MELFA RV-1A (Рис.4).

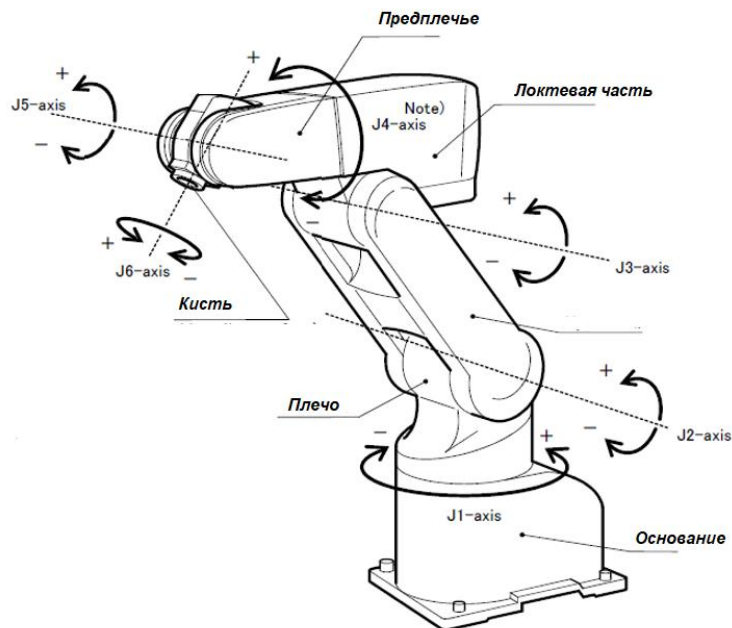


Рис.4 – Робот Mitsubishi MELFA RV – 1A

На основании установлен (ось J1) сустав, соединённый (ось J2) с плечом, на котором закреплена (ось J3) локтевая часть руки, которая соединяется (ось J4) с предплечьем, где на конце расположена (ось J5) кисть 6, совершающая вращательное движение (ось J6).

На **Рис.5** изображена схема экспериментальной установки для оптимального вращения стержня вокруг неподвижной оси: 1 – консольный стержень с распределённой массой; 2 – механический интерфейс на кисти, вращающийся вокруг оси J6; 3 – Робот Mitsubishi MELFA RV-1A; 4 – контроллер робота; 5 – ПК; 6 – Arduino Mega 2560 с прикрепленным к нему акселерометром MPU 6050 .

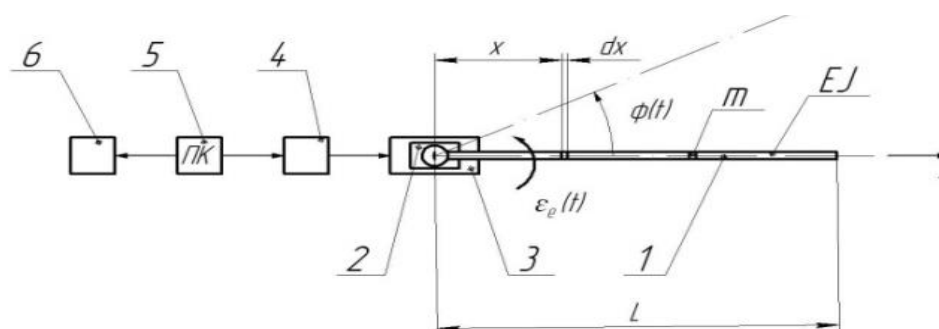


Рис. 5 – Схема экспериментальной установки

Arduino Mega построена на микроконтроллере ATmega2560. Имеет 54 цифровых входа/выходов, 14 из которых могут использоваться как выходы ШИМ; 16 аналоговых входов; 4 последовательных порта UART; кварцевый генератор 16 МГц; USB коннектор; разъем питания; разъем ICSP; кнопка перезагрузки. Необходимо платформу подключить к компьютеру посредством кабеля USB или подать питание при помощи адаптера AC/DC, либо аккумуляторной батареей.

Модуль GY-521 построен на базе микросхемы **MPU6050**. На плате модуля также расположена «обвязка» MPU6050, включая подтягивающие резисторы интерфейса I2C. Гироскоп используется для определения углов поворотов по осям X, Y, Z, благодаря измерения угловых скоростей, а акселерометр – проекцию ускорения на оси X, Y, Z,. Совместное использование акселерометра и гироскопа позволяет определить движение тела в трехмерном пространстве.

Arduino IDE – оригинальная интегрированная среда создателей платформы. Для написания программы (Sketch) использована среда Arduino IDE. Arduino IDE, включающая редактор (на базе Java-IDE Processing), компилятор (AVR-GCC), программатор (avrdude). Для программирования модифицированного фильтра Калмана применена стандартная библиотека <Wire.h> и специальный написанный класс – <Kalman.h>. Программа позволяет регистрировать колебаний с использованием фильтра Калмана.

Программирование робота осуществлялось в среде **COSIROP** на языке MELFA BASIC IV. Программа предусматривает поворот кисти вокруг оси J6 (Рис.1).

```

15 OVRD 100
20 IF M_IN(1)=1
THEN
25 ACCEL 60,80
30 MVS P3
40 ENDIF
50 GOTO 60
60 IF M_IN(3)=1
THEN
70 MVS P2
80 ENDIF
90 GOTO 15
    
```

Первой строкой задается скорость в % от максимальной, развиваемой приводом узла. По нажатию кнопки, связанной со входом 1, происходит перемещение в позицию P3 при управлении (ускорении) типа разгон-торможение (команда ACCEL). Принцип работы команды ускорение: ACCEL 60, 80 устанавливает ускорение до 60% и замедление до 80%. (Для максимального ускорения / замедления 0,2 с; ускорение 0,2 / 0,6 = 0,33 с. замедление 0,2 / 0,8 = 0,25 с.). По нажатию кнопки, связанной со входом 3, происходит поступательное перемещение в позицию P2, при этом за 0,2с разгоняется до заданной в программе скорости.

На языке MELFA-BASIK IV в среде COSIROP написана программа реализации оптимального вращения консольного стержня промышленным роботом Mitsubishi Electric. К механическому интерфейсу кисти (ось J6) робота жестко прикреплен экспериментальный образец (Рис.6) .



Рис.6 – Экспериментальный стенд для исследования оптимального вращения стержня конечной жесткости

Относительное движение консольного стержня с распределенной массой описывается уравнением

$$EJ \frac{d^4 W}{dx^4} + m_0 \frac{d^2 W}{dt^2} = -mE_e(t) \cdot x, \quad (5)$$

где $E_e(t) = E_0 \sin pt$. С учетом первой формы колебаний использовано решение $W(x, t) = U_1(x) \sin pt$. Из (5) следует уравнение

$$\frac{d^4 U}{dx^4} - k^4 U_1 = -Ax, \quad (6)$$

где $k^4 = \frac{p^2 m}{EJ}$, $A = \frac{E_0 m_0}{EJ}$; общее решение уравнения (6)

$$U_1(x) = C_1 \sin(kx) - C_2 \cos(kx) + C_3 \operatorname{sh}(kx) + C_4 \operatorname{ch}(kx) + \frac{E_0}{p^2} x,$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – производные постоянные, которые находятся с учетом краевых условий ($U_1 = u$):

$$x=0; u(0)=0; u'(0)=0; \quad x=L; u''(L)=0; u'''(L)=0$$

Возможно приближенное решение, обеспечивающее удовлетворительное согласование с экспериментом; оно основано на сведении исходной системы к эквивалентной в смысл равенства частоты собственных колебаний системы с сосредоточенной массой и частоты первого тона исходной системы:

$$(1,975)^2 \sqrt{\frac{EJ}{mL^4}} - \sqrt{\frac{3EJ}{mL_1 L_1^3}} = 0. \quad (7)$$

Из (7) получено: $L_1 = 0,702L$. С учетом только первой формы колебаний теперь относительное движение описывается уравнением

$$\frac{d^2 W_1}{dt^2} + k^2 W_1 = -L_1 E_0 \cos pt \quad (8)$$

Анализ результатов экспериментальных исследований.

Результаты измерений ускорения конца консоли сведены к массиву $A[1..21]$ фиксированных значений ускорений с шагом $\Delta t = 0,055$ с. Для аппроксимации ускорений по способу наименьших квадратов использовалась аналитическая функция

$$U_e(t) = -B \sin pt - C \sin kt,$$

где $B, C, p, k = \text{const}$, k – частота первого тона колебаний стержня. После вычисления, с использованием способа наименьших квадратов, получены следующие значения констант: $B = -4,32$ м/с²; $C = 1,024$ м/с.

Для сравнения экспериментальных исследований с эквивалентным (релейному) гармоническим воздействием принята функция

$$U_e^*(t) = E \sin pt \quad (9)$$

с учетом условия $\int_0^{T/2} E \sin(pt) dt = \frac{E_0 T}{2}$, где $T = \frac{2\pi}{p}$; $p = \frac{k}{4}$, где k – частота первой моды собственных колебаний испытуемого упругого объекта.

В переносном вращательном движении после двукратного интегрирования уравнения (9) с учетом краевых условий

$$\varphi_e(0) = 0, \quad \omega_e(0) = 0, \quad \varphi_e(T) - \varphi^* = 0,$$

где φ^* – конечный угол поворота стержня, получены аналитические выражения для угловой скорости и угла поворота:

$$U_e(t) = \frac{\varphi_e^* p^2}{2\pi} \sin pt; \quad \omega_e^*(t) = \frac{\varphi_e^* p}{2\pi} (1 - \cos pt); \quad \varphi_e(t) = \frac{\varphi_e^*}{2\pi} (1 - \cos pt) \quad (10)$$

Для относительного движение конца стержня в уравнении (9) принято $E^* = \frac{\varphi_e^* p^2}{2\pi} L_1$, $\varphi^* = \pi/2$.

Как следует из графиков (**Рис.7**), в момент времени $t = T$ достигается относительный покой $W_1(T) = 0$, $\dot{W}_1(T) = 0$, $\ddot{W}_1(T) = 0$. Выбор времени движения T обоснован с использованием моментных соотношений $W_1^*(T) = 0$, $\dot{W}_1^*(T) = 0$, которые после преобразований сводятся к системе трансцендентных уравнений с общими корнями ($k = 4p$, $p = \frac{2\pi}{T}$).

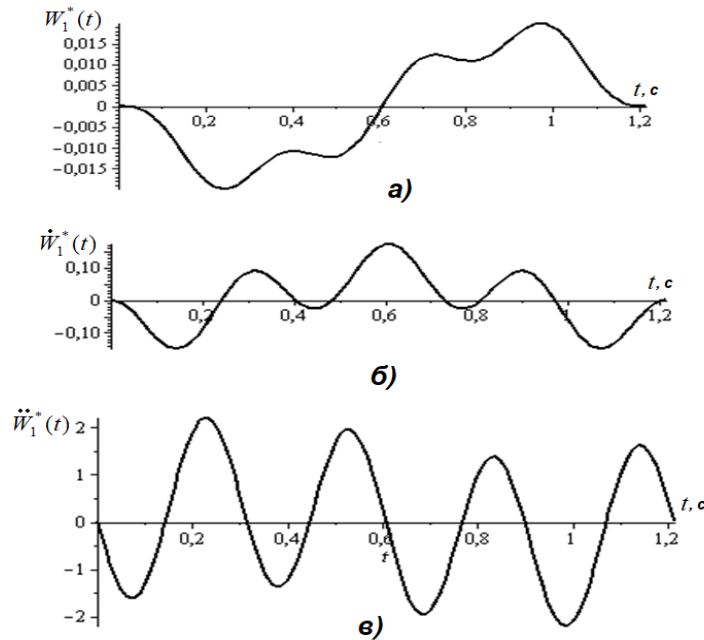


Рис.7 – Графики относительного перемещения (в), скорости (б), ускорения (а) конца стержня

Графики движения согласно эквивалентному гармоническому воздействию изображены на **Рис.8**

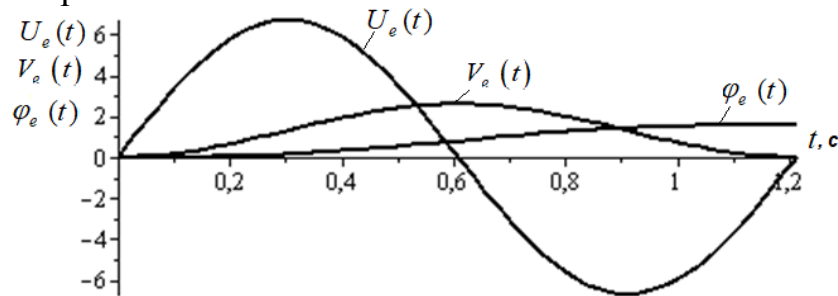


Рис.8 – Графики переносного вращения

С учетом $\varphi^* = \frac{\pi}{2}$ и времени $T = 1,2$ график $U_e(t)$ и график $U_e^*(t) + W_1^*(t)$ изображены на **Рис.9**.

Как и следовало ожидать, экспериментальные значения ускорений меньше по сравнению с найденными теоретическими.

На **Рис.9**, **Рис.10**, **Рис.11** изображены графики абсолютных скоростей и перемещений, полученных экспериментально и теоретически.

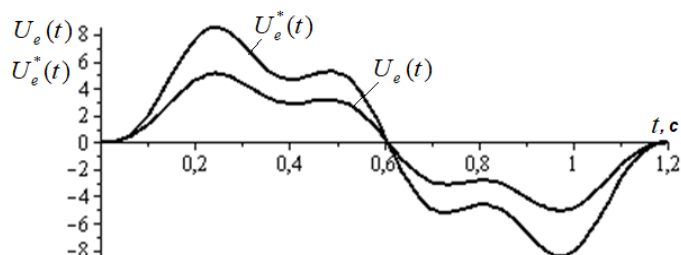


Рис.9 – Графики абсолютных экспериментального и теоретического угловых ускорений

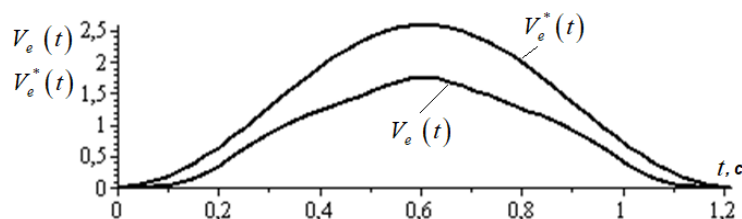


Рис.10 – Графики абсолютных (экспериментального и теоретического) угловых скоростей

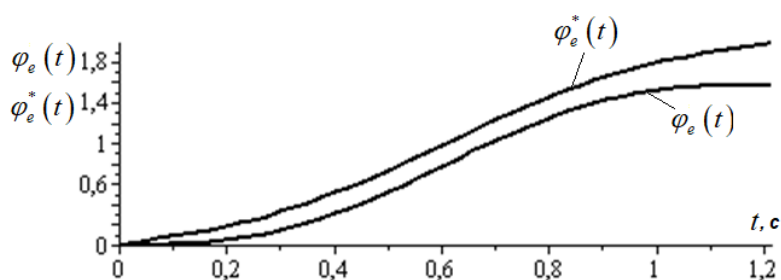


Рис.11 – Графики углов поворота

При выполнении экспериментальных исследований реализована последовательность шагов для определения загружаемых в программу исходных параметров, отражающих моделируемое движение конца стержня конечной жесткости при оптимальном вращении.

1. Из расчетов найдено $\omega_{\max} = 2,57$ рад/с.

2. Поскольку параметры робота известны в градусах в секунду, то

$$\text{выполнено преобразование } \omega_{\max} = \frac{180 \cdot 2,57}{\pi} = 147,25 \text{ град/с.}$$

3. Функция робота OVRD предполагает задание ω_{max} в % от предельной (210 град/с) скорости привода, реализующего вращение вокруг оси J6. Расчетная угловая скорость ω_{max} составляет 70,1% от предельной.
4. Функция робота ACCEL реализует релейное управление (разгон-торможение). Необходимо задать значение скорости ω_1 в % от предельной скорости привода через 0,2 с. после пуска (**Рис.12**).

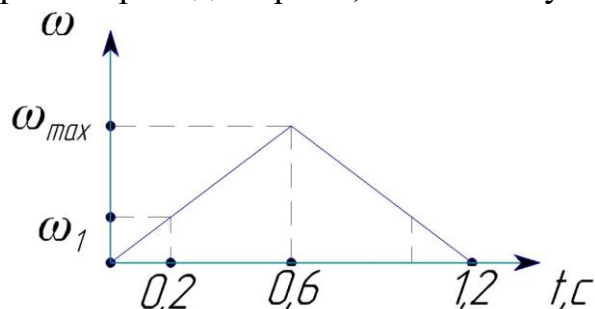


Рис.12 – Предполагаемая угловая скорость поворота кисти робота

5. Рассчитаем ω_1 при $t=0,2$ с.: $\frac{0,2 \cdot \omega_{max}}{0,6} = 49,08$ град/с.

6. Поэтому ω_1 составляет от предельной: $\frac{49,08}{210} \cdot 100\% = 23,3\%$.

7. Для функции получаем значение ACCEL 23.3, 23.3.

С приемлемыми для данного эксперимента допущениями результаты теоретической модели качественно и количественно согласуются, подтверждая реальные динамические свойства поведения упругой системы при оптимальном кососимметричном управлении вращением.

Рис.13 отражает характер изменения ускорений конца стержня при реальном движении, приближенной функции и функции ускорения, полученной с использованием встроенной процедуры MOV.

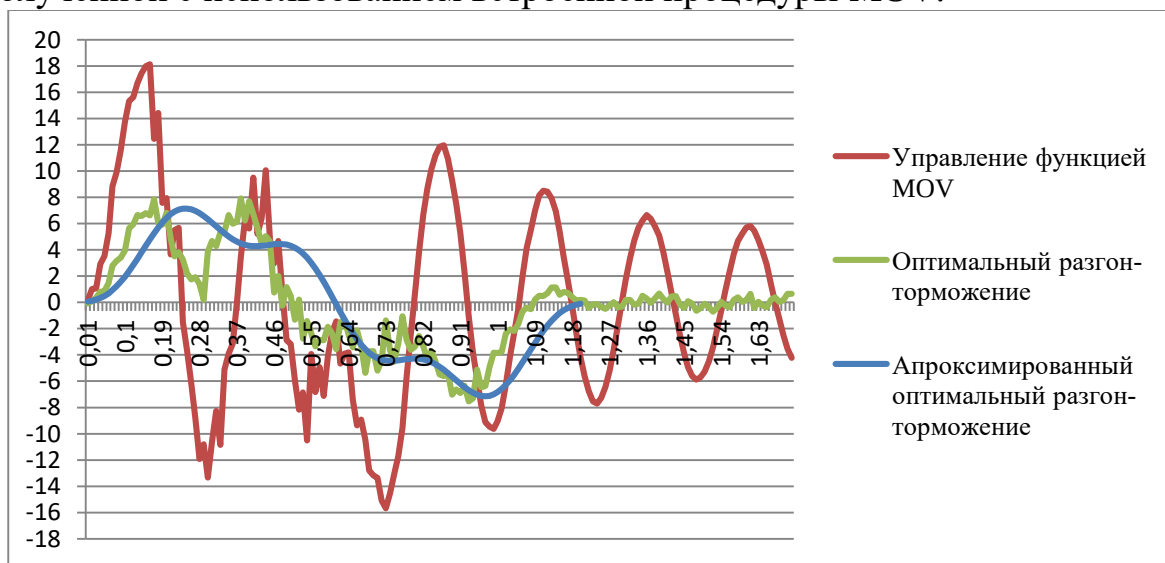


Рис.13 – Совмещенные графики ускорения свободного конца стержня

Заключение.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили практическую возможность и целесообразность в современных условиях реализовывать кососимметричные управления не только переносным поступательным перемещением упругих объектов и систем с элементами конечной жесткости (и, следовательно, минимальной массы), но и вращение вокруг неподвижной оси.

Программа дальнейшей работы включает теоретические и экспериментальные исследования сложных движений систем с элементами конечной жесткости, например, исполнительных органов манипуляторов минимальной массы при выполнении ими быстрых операций монтажа крупногабаритных нежестких конструкций при их монтаже в земных условиях и в космическом пространстве.

Библиографический список

1. Воронов А.А. Теория автоматического управления. ч.II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М., Высш. школа, 1977. – 288с.
2. Петров Ю.П. Обеспечение достоверности и надежности компьютерных расчетов / Ю.П. Петров – СПб: БХВ – Петербург, 2008. – 160с.
3. Портнягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Портнягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Физматиз, 1961. – 392с.
4. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536с.
5. Теория автоматического управления / Под ред. А.В. Нетушила. – М.: Высшая школа, 1972. – Т.II. – 432с.
6. Абдулаев, Н.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов / Н.Д. Абдулаев, Ю.П. Петров. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 240с.
7. Черноусько, Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 387с.
8. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832с.
- Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304с.
9. Карновский И.А., Почман Ю.М. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем – К. «Высш. школа», 1982. – 416 с.
10. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями. / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
11. Бохонский, А.И., Варминская Н.И., Мозолевский М.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения. /Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь, изд-во Сев НТУ, 2007. – 296 с.

12. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисление в механике: монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь, СевНТУ, 2007. – 296с.
13. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления / А. Бохонский, – Palmarium Academic Publishing. Deutschland/ Германия, 2013 – 77р.
14. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. Монография. – М. Вузовский учебник. ИНФРА. – М., 2016. – 174с.
15. Bokhonsky, A.I. Modeling and analysis of elastic systems in motion/ Gliwice. Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.

Bibliograficheskiy spisok

1. Voronov A.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. ch.II. Teoriya nelinejnyh i special'nyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. – М., Vyssh. shkola, 1977. – 288s.
2. Petrov YU.P. Obespechenie dostovernosti i nadezhnosti komp'yuternyh raschetov / YU.P. Petrov – SPb: BHV – Peterburg, 2008. – 160s.
3. Portnyagin, L.S. Matematicheskaya teoriya optimal'nyh processov / L.S. Portnyagin, V.G. Boltyanskij, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishchenko. – М.: Fizmatiz, 1961. – 392s. 4. Solodovnikov, V.V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. YAKovlev. – М.: Mashinostroenie, 1985. – 536s. 5. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. A.V. Netushila. – М.: Vysshaya shkola, 1972. – T.II. – 432с.
6. Abdulaev, N.D. Teoriya i metody proektirovaniya optimal'nyh regulyatorov / N.D. Abdulaev, YU.P. Petrov. – L.:Energoatomizdat, 1985. – 240s.
7. CHernous'ko, F.L. Upravlenie kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – М.: Nauka, 1980. – 387s.
8. Dorf, R. Sovremennye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop; Per. s angl. B.I. Kopylova. – М.: Laboratoriya bazovyh znaniy, 2002. – 832s.
- Krut'ko, P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemyh sistem: linejnye modeli. – М.: Nauka, 1987. – 304s.
9. Karnovskij I.A., Pochman YU.M. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemyh sistem – К. «Vyssh. shkola», 1982. – 416 s.
10. CHernous'ko F.L. Upravlenie kolebaniyami. / F.L. CHernous'ko, P.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – М.: Nauka, 1980. – 384 s.
11. Bohonskij, A.I., Varminskaya N.I., Mozolevskij M.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem deformiruemyh ob'ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya. /Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol', izd-vo Sev NTU, 2007. – 296 s.
12. Bohonskij A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischislenie v mekhanike: monografiya / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – Sevastopol', SevNTU, 2007. – 296s.

13. Bohonskij A.I. Aktual'nye zadachi variacionnogo ischisleniya / A. Bohonskij, – Palmarium Academic Publishing. Deutschland/ Germaniya, 2013 – 77p.
14. Bohonskij A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti. Monografiya. – M. Vuzovskij uchebnik. INFRA. – M., 2016. – 174s.
15. Bokhonsky, A.I. Modeling and analysis of elastic systems in motion/ Gliwice. Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.

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

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

³*Рыжков Александр Игоревич, ассистент кафедры "Техническая механика и машиноведение", ryzhkov2206@mail.ru, Севастополь, Севастопольский государственный университет.*

EXPERIMENTAL TEST OF THE ELASTIC ROD OPTIMAL ROTATION

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

Using the robot (Mitsubishi Robot RV-1A) in the laboratory of the Department of Instrument Systems and Automation of Technological Processes of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", the optimal rotation around a fixed axis (at a given angle during the acceptable minimum possible time) of an elastic cantilever rod with distributed mass along the length from the initial to the final state of absolute rest. Results of the practical implementation of skew-symmetric control (the "acceleration-braking" type of angular acceleration) are in sufficient agreement with the theoretical modeling of the dynamics of an elastic object with optimal portable rotational motion around an axis passing through the end of an elastic rod.

Key words: optimal control (angular acceleration), elastic rod (finite rigidity), experimental verification, manipulator, elimination of object vibrations.

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

Maystrishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, e-mail: mihail.maystrishin@gmail.com Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

Ryzhkov Aleksandr Igorevich, assistant of the Department of Technical Mechanics and Engineering, e-mail: ryzhkov2206@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ДЕТАЛИ С ПОМОЩЬЮ СИЛОМОМЕНТНОГО ДАТЧИКА В СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ ТИПА «ВАЛ-ВТУЛКА» ПРИ ДВУХТОЧЕЧНОМ КОНТАКТЕ С УЧЕТОМ ТРЕНИЯ

Вартанов М.В.¹, Петров В.К.², Зинина И.Н.³, Нгуен Ван Зунг⁴, Чан Динь Ван⁵

Аннотация. Статья посвящена идентификации положения детали по данным силомоментного датчика в сборочных операциях типа «вал-втулка» при двухточечном контакте. Получены аналитические зависимости сил и моментов, измеренных датчиком сил и моментов. Описаны теоретические и экспериментальные оценки допустимых значений угла перекоса деталей.

Ключевые слова. Роботизированная сборка, условия сборки, силомоментный датчик

Постановка задачи

В технологии автоматической сборки наиболее ответственным этапом является сопряжение деталей. Традиционный подход на основе создания программных траекторий не всегда позволяет обеспечить выполнение условий собираемости. Альтернативой является корректировка программных траекторий на основе позиционно-силового управления роботом. Процесс автоматического сопряжения, как правило, разбивается на несколько этапов. На каждом из этапов имеет место своя задача контактного взаимодействия. Предполагается изучить эти условия на основе аналитического и экспериментального решений. Наиболее ответственным с позиций технологической надежности является этап двухточечного контакта, именно на этом этапе сопряжения и возникают проблемы с обеспечением технологической надежности

Графическое представление контактного взаимодействия деталей при двухточечном контакте.

В сборочных операциях типа «вал-втулка» при роботизированной сборке возникает задача корректировки положения детали типа «вал» по значениям параметров силомоментного датчика, установленного на выходном звене манипулятора.

При двухточечном контакте силы, действующие на вал со стороны втулки, лежат в плоскости контакта, проходящей через точки контакта A и B и ось вала. Поэтому задача решена для плоской произвольной системы сил. Силы, действующие на вал, показаны на **Рис.1**. Вес вала на силовой схеме не показан, так как он пренебрежительно мал по сравнению со сборочным усилием F .

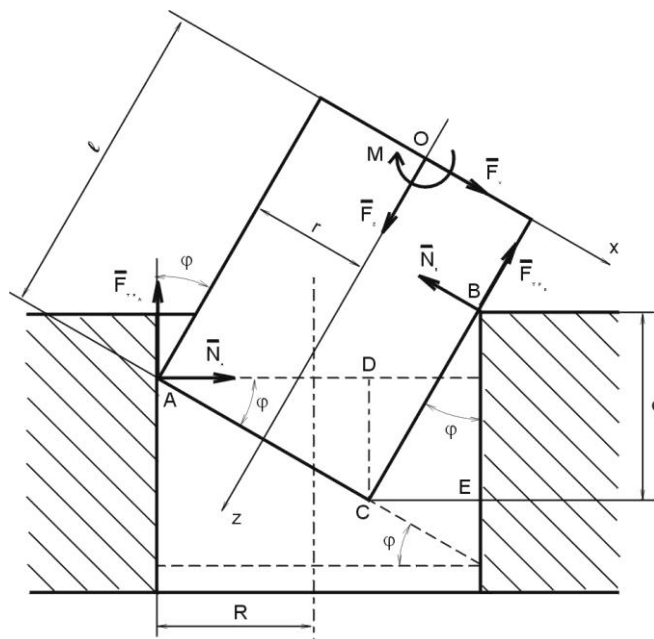


Рис.1 – Схема действия сил на вал при двухточечном контакте с учетом закрепления вала в схвате робота

Однако, при использовании силомоментного датчика показания снимаются в виде сил и моментов, направленных вдоль трех осей координат: ось Oz_1 направлена вдоль оси вала, а оси Ox_1 и Oy_1 ей перпендикулярны и лежат в плоскости поперечного сечения вала (**Рис.2**).

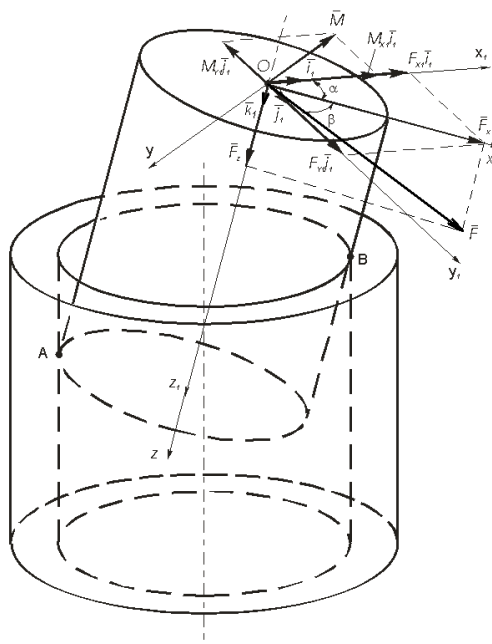


Рис.2 – Схема сил и моментов, действующих на вал в системе координат силомоментного датчика (системы координат $Oxyz$ и $Ox_1y_1z_1$)

Таким образом, с датчика фактически снимаются проекции вектора силы на оси координат F_{x1} , F_{y1} , F_{z1} и проекции вектора момента M_{x1} , M_{y1} , M_{z1} . Для решения поставленной задачи следует представить силу в виде осевой – $\vec{F}_z$ и радиальной – $\vec{F}_x$, лежащей в плоскости контакта. Поскольку оси Oz и Oz_1 совпадают,

$$\vec{F}_z = F_{z1} \cdot \vec{k}_1, \text{ где } \vec{k}_1 - \text{орт оси } Oz_1. \quad (1)$$

Модуль силы $\vec{F}_x$ определяется через ее проекции на оси Ox_1 и Oy_1 :

$$F_x = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2}. \quad (2)$$

а направление вектора $\vec{F}_x$ определяется направляющими косинусами углов между вектором силы и положительными направлениями осей координат:

$$\cos(\vec{F}_x; \vec{i}_1) = \cos \alpha = \frac{F_{x1}}{F_x}, \cos(\vec{F}_x; \vec{j}_1) = \cos \beta = \frac{F_{y1}}{F_x}, \quad (3)$$

которые определяют также положение точек контакта A и B относительно осей Ox_1 и Oy_1 . Частный случай показан на рис. 2. Пусть, например, проекции силы на оси Ox_1 и Oy_1 положительны (т.е. $F_{x1} > 0, F_{y1} > 0$), тогда:

$$\vec{F}_x = F_{x1} \cdot \vec{i}_1 + F_{y1} \cdot \vec{j}_1. \quad (4)$$

Направляющие косинусы позволяют определить корректирующее перемещение вала в системе координат Ox_1y_1 . Предположим, что в результате расчетов необходимо перемещение вала вдоль оси Ox на величину S_x (проекция вектора перемещения на ось, которая может быть как положительной, так и отрицательной), тогда проекции вектора перемещения на оси Ox_1 и Oy_1 определяются так:

$$S_{x1} = S_x \cos \alpha = S_x \frac{F_{x1}}{F_x}, S_{y1} = S_x \cos \beta = S_x \frac{F_{y1}}{F_x}. \quad (5)$$

По данным с датчика проекции M_{x1} и M_{y1} вектора $\vec{M}$ на оси Ox_1 и Oy_1 , а его модуль:

$$M = \sqrt{M_{x1}^2 + M_{y1}^2} \quad (6)$$

и направляющие косинусы:

$$\cos(\vec{M}; \vec{i}_1) = \cos \alpha = \frac{M_{x1}}{M}, \cos(\vec{M}; \vec{j}_1) = \cos \beta = \frac{M_{y1}}{M}. \quad (7)$$

При двухточечном контакте вектор момента $\vec{M}$ должен быть направлен перпендикулярно вектору силы $\vec{F}_x$ (вдоль оси Oy). Если $F_{x1} > 0, F_{y1} > 0$, то проекция вектора $\vec{M}$ отрицательна. На **Рис.1** момент показан направленным по часовой стрелке, что соответствует направлению вектора $\vec{M}$ «от нас», т.е. в отрицательном направлении оси Oy (**Рис.2**). Его проекция M_{y1} должна быть отрицательна:

$$\cos\left(\vec{M} \wedge \vec{j}_1\right) < 0. \quad (8)$$

предположим, что в результате расчетов выяснилось, что необходимо повернуть вал вокруг оси Oy на угол φ . Тогда с помощью направляющих косинусов этот поворот представим угловыми перемещениями вокруг осей Ox_1 и Oy_1 :

$$\varphi_{x1} = \varphi \cos\left(\vec{M} \wedge \vec{i}_1\right) = \varphi \frac{M_{x1}}{M}, \quad \varphi_{y1} = \varphi \cos\left(\vec{M} \wedge \vec{j}_1\right) = \varphi \frac{M_{y1}}{M}. \quad (9)$$

Уравнения взаимосвязи сил и моментов, определяющих положение точки контакта деталей.

На **Рис.1** дано совмещение деталей под действием приложенного к валу вращающего момента M [3]. Уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} F_x - N_B + N_A \cos \varphi - F_{TP_A} \sin \varphi &= 0, \\ F_z - F_{TP_B} - N_A \sin \varphi - F_{TP_A} \cos \varphi &= 0, \\ F_{TP_B} r - N_B \left(l - \frac{q}{\cos \varphi}\right) + N_A l \cos \varphi - N_A r \sin \varphi - F_{TP_A} r \cos \varphi - F_{TP_A} l \sin \varphi - M &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Рассмотрим состояние предельного равновесия, когда силы трения покоя достигают своих максимальных значений:

$$F_{TP_{A\max}} = fN_A, \quad F_{TP_{B\max}} = fN_B, \quad (11)$$

где f – коэффициент трения покоя. Тогда уравнения равновесия примут вид:

$$\begin{aligned} F_x - N_B + N_A \cos \varphi - fN_A \sin \varphi &= 0, \\ F_z - fN_B - N_A \sin \varphi - fN_A \cos \varphi &= 0, \\ fN_B r - N_B \left(l - \frac{q}{\cos \varphi}\right) + N_A l \cos \varphi - N_A r \sin \varphi - fN_A r \cos \varphi - fN_A l \sin \varphi - M_y &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Значения реакций определяются из первых двух уравнений (12), их значения от величины сборочного момента:

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{F_z - fF_x}{2f \cos \varphi + (1 - f^2) \sin \varphi}, \\ N_B &= \frac{fF_x \cos \varphi + F_x \sin \varphi + F_z \cos \varphi - fF_z \sin \varphi}{2f \cos \varphi + (1 - f^2) \sin \varphi}. \end{aligned} \quad (13)$$

После постановки N_A , N_B в третье уравнение системы (12) получим:

$$\begin{aligned} &\frac{fF_x \cos \varphi + F_x \sin \varphi + F_z \cos \varphi - fF_z \sin \varphi}{2f \cos \varphi + (1 - f^2) \sin \varphi} (rf - l + \frac{q}{\cos \varphi}) + \\ &+ \frac{F_z - fF_x}{2f \cos \varphi + (1 - f^2) \sin \varphi} (l \cos \varphi - rf \cos \varphi - r \sin \varphi - fl \sin \varphi) - M = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

В работе [4],[5] приведено условие заклинивания для двухточечного контакта, определяемые как:

$$\varphi_{don} = \frac{\delta_{cmin}}{f \cdot D}, \quad (15)$$

где φ_{don} – допустимый угол заклинивания (рад), f – коэффициент трения, D – диаметр вала, δ_{cmin} – минимальный зазор.

Процесс соединения выполняется без заклинивания когда:

$$\varphi < \varphi_{don} \quad (16)$$

Экспериментальная установка.

Приведем описание структуры и алгоритм функционирования экспериментальной установки для исследования роботизированной сборки, дооснащенной силомоментным датчиком и захватным устройством (**Рис.3**) [1]. Установка собрана на базе промышленного робота ABB IRB 140 с контроллером IRC5. Экспериментальные образцы 3 (цилиндрические вал и втулка) жестко базируют в захватном устройстве 2 и базовом приспособлении 4. Информацию о возникающих в зоне сборки силах и моментах, поступающую в систему управления промышленным роботом, регистрируют персональным компьютером 5.

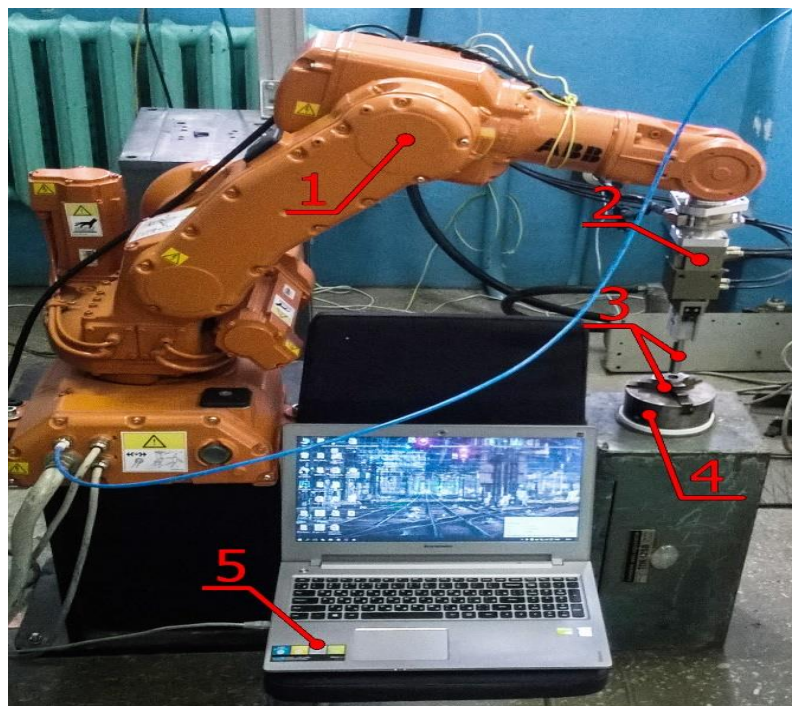


Рис.3 – Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки

1 – промышленный робот ABB IRB 140; 2 – захватное устройство; 3 – экспериментальные образцы; 4 – базовое приспособление; 5 – персональный компьютер

Эксперимент проведен с помощью программы RobotStudio для моделирования процесса сборки и программы ATINetFT для записи изменений сил и моментов, возникающих при сопряжении. Из уравнений (14), значение угла перекоса φ определяются с помощью системы MATLAB, эти значения описаны в таблице 1.

Таблица 1. – Экспериментальные данные

№	F_{x1}	F_{y1}	F_{z1}	M_{x1}	M_{y1}	M_{z1}	q	α	β	φ
1	-3,1	-0,9	0	0,1	-0,4	0	0,25	0,283	1,288	-0,335
2	-2,7	-0,7	0	0,1	-0,3	0	0,5	0,254	1,317	1,422
3	-3,3	-0,8	0,1	0,1	-0,4	0	0,75	0,238	1,333	-0,236
4	-2,9	-0,7	0,05	0,1	-0,3	0	1	0,237	1,334	1,474
5	-4	-0,9	0,05	0,12	-0,5	0	1,25	0,221	1,349	-0,302
6	-3,6	-1,1	-0,5	0,15	-0,45	0	1,5	0,297	1,274	-4,524
7	-5,2	-1,5	-6,9	0,2	-0,6	0	1,75	0,281	1,290	0,220
8	-6,2	-1,3	-24,3	0,25	-0,6	0	2	0,207	1,364	0,039
9	-8,8	-1,1	-45,6	0,3	-0,75	0	2,25	0,124	1,446	0,016
10	-12,2	-0,9	-64	0,37	-0,98	0	2,5	0,074	1,497	0,006

Как отмечалось выше, эксперимент являлся подтверждением ситуации двухточечного контакта в зоне сборки [2]. Как видно из таблицы 1, измерения проводились в 10 точках в процессе сопряжения экспериментальных образцов. Таким образом, глубина сопряжения вала во втулку составила 2,5 мм, шаг приращения был выбран 0,25 мм и подбирался экспериментально в процессе исследования. В нашем эксперименте рассчитан угол перекося сопрягаемых поверхности посадки $\varnothing 16 \frac{H7}{e7}$. Допустимый угол перекося сопрягаемых поверхностей при двухточечном контакте $\varphi_{дон}$:

$$\varphi_{дон} = \frac{\delta_{сmin}}{fD} = \frac{0,032}{0,216} = 0,01(рад).$$

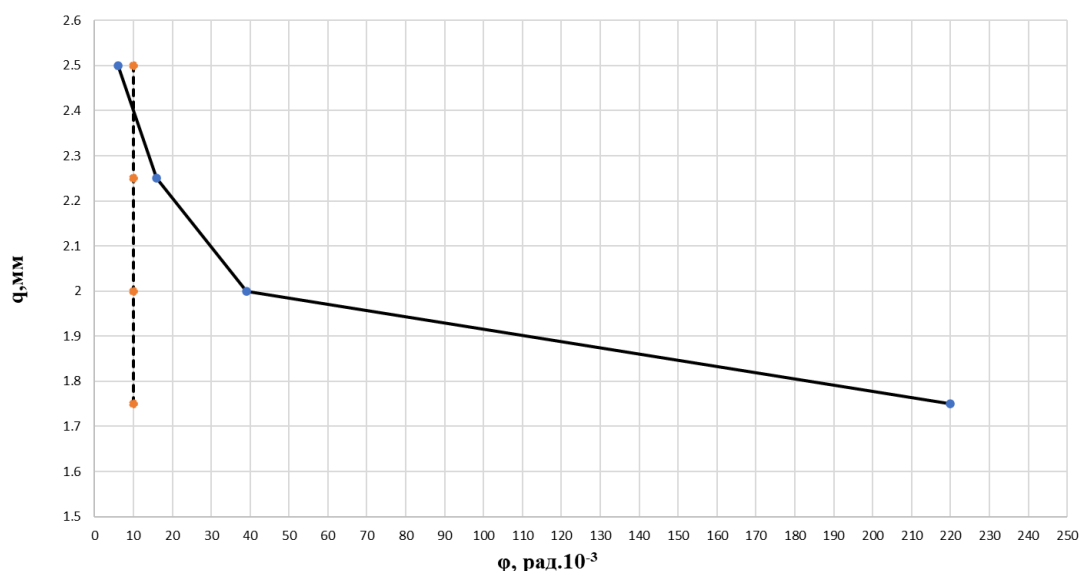


Рис.4 – Сравнение теоретически допустимого значения угла перекося с углом перекося сопрягаемых поверхностей, полученным в ходе эксперимента

Заключение.

Получены допустимые значения угла перекося при заклинивании сопрягаемых поверхностей собираемых деталей в процессе выполнения сопряжения с малыми зазорами. Выполнено сравнение теоретически допустимого значения угла перекося с углом перекося сопрягаемых поверхностей, полученным экспериментально. Полученный результат позволяет решать задачу технологической надежности сборочной операции при двухточечном контакте сопрягаемых поверхностей.

Выполненные исследования дают промежуточный результат для разработки контактных состояний сборки. Общей целью исследований

является разработка алгоритма управления сборочным роботом на основе управления переходами между контактными состояниями сборочного процесса.

Библиографический список

1. Вартанов М.В., Архипов М.В., Петров В.К., Мищенко Р.С. Экспериментальные исследования условий собираемости при активной роботизированной сборке// «Станки и инструмент», 2017, №4. С. 14 -16.
2. Вартанов М.В., Петров В.К., Мищенко Р.С., Зыгмантович, М.А. Экспериментальная проверка контактных ситуаций в зоне сопряжения при роботизированной сборке прецизионных цилиндрических соединений // Сборник трудов V международного научно-технического семинара «Современные технологии сборки» (Москва, 19-20 октября 2017 г.) С.103-108.
3. Черняховская Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей: Монография / Самара: Самар. гос.техн. ун-т, 2011. – 75 с.: 55 ил.
4. Справочник по промышленной робототехнике: в 2 кн. пер. с англ. / под ред. Ш. Ноффа. – М.: Машиностроение, 1990. – 480 с.:ил
5. Холодкова А.Г., Кристаль М.Г., Штриков Б.Л., Зенкин А.С., Арпентьев Б.М., Андреев А.Г. Технология автоматической сборки/ Под. Ред. А.Г. Холодковой. – М.: Машиностроение, 2010. – 560с.
6. Шахинпур М. Курс робототехники - М., Мир, 1990.-527 с., ил.
7. Reiff Ellen Christine. Sensoren fur Handling and Montegetechnik //DHF: Forder-, Lager and Transportertechn., Log., Autom, 2000,46, №2, p. 56-57.
8. Вахрин Л.А., Мясников В.К., Сеницын В.Т. Адаптивное управление процессами сопряжения деталей при автоматической сборке // «Сборка в машиностроении, приборостроении», 2001, №11, с.24-29.
9. Воротников С.А., Михайлов Б.Б., Ющенко А.С. Дистанционное управление адаптивными роботами. Состояние и перспективы// «Актуальные проблемы защиты и безопасности»: Труды Восьмой Всероссийской НТК, Том 5 «Экстремальная робототехника», Сп-Б, 2005, с.79-83.
10. Contec Adam S. A haptic assembly and disassembly simulation environment and associate computational Poad optimization techniques//Trans.ASME Journal Comput. and Inf. Science Eng. 2001,1, №2, p.113-122.

Bibliograficheski spisok

1. Vartanov M.V., Arhipov M.V., Petrov V.K., Mishchenko R.S. Eksperimental'nye issledovaniya uslovij sobiraemosti pri aktivnoj robotizirovannoj sborke// «Stanki i instrument», 2017, №4. С. 14 -16.
2. Vartanov M.V., Petrov V.K., Mishchenko R.S., Zygmantovich, M.A.

- Eksperimental'naya proverka kontaktnyh situacij v zone sopryazheniya pri robotizirovannoj sborke precizionnyh cilindricheskih soedinenij // Sbornik trudov V mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminara «Sovremennye tekhnologii sborki» (Moskva, 19-20 oktyabrya 2017 g.) С.103-108.
3. CHernyahovskaya L.B. Kinematicheskij i dinamicheskij analizy avtomaticheskoy sborki cilindricheskih detalej: Monografiya / Samara: Samar. gos.tekhn. un-t, 2011. – 75 s.: 55 il.
 4. Spravochnik po promyshlennoj robototekhnike: v 2 kn. per. s angl. / pod red. SH. Noffa. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 480 s.:il
 5. Holodkova A.G., Kristal' M.G., SHtrikov B.L., Zenkin A.S., Arpent'ev B.M., Andreev A.G. Tekhnologiya avtomaticheskoy sborki/ Pod. Red. A.G. Holodkovoju. – M.: Mashinostroenie, 2010. – 560s.
 6. SHahinpur M. Kurs robototekhniki - M., Mir, 1990.-527 s., il.
 7. Reiff Ellen Christine. Sensoren fur Handling and Montegetechnic //DHF: Forder-, Lager and Transportertech, Log., Autom, 2000,46, №2, r. 56-57.
 8. Vahrin L.A., Myasnikov V.K., Sinicyn V.T. Adaptivnoe upravlenie processami sopryazheniya detalej pri avtomaticheskoy sborke // «Sborka v mashinostroenii, priborostroenii», 2001, №11, s.24-29.
 9. Vorotnikov S.A., Mihajlov B.B., YUshchenko A.S. Distancionnoe upravlenie adaptivnymi robotami. Sostoyanie i perspektivy// «Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti»: Trudy Vos'moj Vserossijskoj NTK, Tom 5 «Ekstremal'naya robototekhnika», Sp-B, 2005, s.79-83.
 10. Contec Adam S. A haptic assembly and disassembly simulation environment and associate computational Poad optimization techniques//Trans.ASME Journal Comput. and Inf. Science Eng. 2001,1, №2, r.113-122.

¹*Вартанов Михаил Владимирович, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», m.v.vartanov@mospolytech.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет*

²*Петров Владимир Кириллович, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика», vkr@hotmail.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет*

³*Зинина Инна Николаевна, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», i.n.zinina@mospolytech.ru Россия, Москва, Московский политехнический университет*

⁴*Нгуен Ван Зунг, аспирант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», nguendungpt45@gmail.com, Россия, Москва, Московский политехнический университет*

⁵Чан Динь Ван, магистрант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», trandinhvan1221@gmail.com Россия, Москва, Московский политехнический университет

IDENTIFICATION OF THE PARTS 'S PROVISION BY USING FORCE TORQUE SENSOR IN THE TYPE ASSEMBLY OPERATIONS "SHAFT-SLEEVE" AT POINT TO POINT CONTACT WITH ACCOUNT OF FRICTION

M.V. Vartanov, V.K. Petrov, I.N. Zinina, V.D. Nguyen, D.V. Tran

This article is to detect identification of parts 's position according to the force-torque sensor in assembly operations type "shaft-sleeve" at point-to-point contact. Obtained analytical dependences of forces and torques, which are measured by force torque sensor. Theoretical and experimental estimates of permissible values skew angle of parts are described.

Keywords: robotic assembly, conditions assembly, force torque sensor.

Vartanov Mikhail Vladimirovich, Doctor of Engineering sciences, prof., professor of department «Technologies and equipment of mechanical engineering», m.v.vartanov@mospolytech.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

Petrov Vladimir Kirillovich, Associate Professor, Ph.D. tech. Sci., Associate Professor of department «Technical Mechanics», vkp@hotbox.r, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

Zinina Inna Nikolaevna, Associate Professor, Ph.D. tech. Sci., Associate Professor of department «Technologies and equipment of mechanical engineering», i.n.zinina@mospolytech.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

Nguyen Van Dung, PhD student of department «Technologies and equipment of mechanical engineering», nguyendungpt45@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

Tran Dinh Van, Master of department «Technologies and equipment of mechanical engineering», trandinhvan1221@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

АНАЛИЗ КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МАНИПУЛЯТОРОВ ПРИ СОГЛАСОВАННОЙ РАБОТЕ

Токарев Д.А.¹, Кабанов А.А.²

Аннотация. В статье рассматривается проблема работы многозвенных манипуляторов с учетом критических состояний, возникающих в процессе планирования движений. Предлагается решить проблему контроля и предотвращения самостолкновений путем введения ограничений в задаче управления движением манипуляторов. Выбор ограничений выполняется для предотвращения повреждений манипуляторами и переносимым ими грузами.

Ключевые слова. Критическое состояние, согласованная работа, робот-манипулятор, самостолкновения, ограничения управления.

В настоящее время работы-манипуляторы достаточно распространены и применяются в широкой области деятельности. Одной из областей применения является подводная робототехника.

Построение областей работы и расчет возможных диапазонов для одного манипулятора является достаточно проработанной задачей, для которой найдено достаточно большое количество решений. Трудности возникают при использовании нескольких манипуляторов в одной области работы и при наличии манипуляторов с ограниченным числом степеней свободы.

Основные критические состояния, с которыми сталкиваются при движении манипуляторов:

- потеря одной или нескольких степеней свободы манипулятора в некоторых из положений;
- ограничение рабочей области в виду присутствия в ней посторонних объектов;
- столкновение рабочих частей робота.

В свою очередь указанные критические состояния проявляются на практике в виде невозможности решить текущую задачу в виде захвата и перемещения грузов в рабочей области.

Дальнейшие рассуждения мы будем строить из условия решения практической задачи перемещении груза манипулятором из точки А в некоторую точку В по рассчитанной траектории. Задача имеет ряд условий и ограничений:

1. База, к которой прикреплены манипуляторы является неподвижной.
2. Координаты точек А и В определены в системе координат, привязанной к базе.

3. Точки А и В достижимы, то есть для них может быть решена задача обратной кинематики.

Задача управления заключается в поиске траекторий изменений координат сочленений, приводящих к переходу схвата манипулятора из точки А в точку В с учетом ограничений. На **Рис.1** представлена рабочая область в двумерной проекции с точками перехода и предполагаемой траекторией.

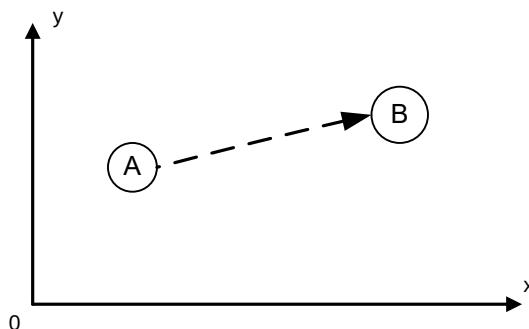


Рис.1 – Задача переноса груза манипулятором

Для первичных расчетов предполагаем, что переход из начальной точки в конечную производится по прямой. Если такое решение не может быть найдено в виду наличия ограничений, то переход производится по модифицированной кривой траектории.

Обозначим сочленения манипулятора как p_i , где $i=1,2,\dots,n$, n – число сочленений. Каждое сочленение манипулятора p_i имеет пространственную координату (x_i, y_i, z_i) . Преобразование, связывающее систему координат i -го сочленения с $(i-1)$ -й, описывается однородной матрицей размерностью 4×4 [1]:

$${}^{i-1}A_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $C\alpha_i$ и $S\alpha_i$ это $\cos(\alpha_i)$ и $\sin(\alpha_i)$, соответственно, θ_i – угол, на который надо повернуть ось X_{i-1} вокруг оси Z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью X_i , α_i – угол, на который надо повернуть ось Z_{i-1} вокруг оси X_i , чтобы она стала сонаправлена с осью Z_i . Для сочленений вращательного типа α_i , $C\alpha_i$, $S\alpha_i$ – константы, θ_i – переменная величина, верхний и нижний индексы матрицы A указывают на звеньев, которые она связывает. В рассматриваемой задаче ограничимся случаем вращательного соединения звеньев.

С помощью матрицы (1) мы связываем координаты сочленения p_i с предыдущим сочленением p_{i-1} :

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

где $p_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)^T$, $p_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$.

Однородная матрица, определяющая положение i -й системы координат относительно базовой системы координат, представляет собой произведение последовательности однородных матриц преобразования

$$T = \prod_{j=1}^i {}^{j-1}A_j(\theta_j) = \begin{pmatrix} {}^0R_i & {}^0d_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где верхняя левая подматрица R_i имеет размерность 3×3 , d_i – вектор, соединяющий начало базовой системы координат с началом i -й системы координат, имеет размерность 3×1 [1].

Рассмотрим задачу появления критических состояний для робота с одним манипулятором и расширим подход для робота с двумя манипуляторами. Предположим, что задача анализа критических состояний для двух и более манипуляторов является развитием и усложнением обнаружения указанных состояний для случая с одним манипулятором.

Проблематика критических состояний. Классический подход к решению задачи управления роботами-манипуляторами основан на построении траектории, по которой будет осуществлен переход из начальной точки нахождения манипулятора в некоторую заданную. При этом достаточно часто решается обратная задача кинематики для каждой точки траектории, по которой пройдет схват робота.

Зная величины углов поворота сочленений θ можно вычислить все координаты звеньев P . Данный случай является прямой задачей кинематики и может быть записан как $\theta \rightarrow P$. Обратная задача аналогично записывается как $P \rightarrow \theta$, но с учетом изначальной постановки задачи в виде перевода схвата из начальной точки в конечную следует

$$\begin{cases} \theta^A = F(p_n^A) \\ \theta^B = F(p_n^B) \end{cases},$$

где A и B – начальная и конечные точки соответственно. С учетом указанного задача сводится к изменению текущих углов поворота сочленений θ^A в θ^B . Текущие углы являются известной величиной, а те, в которые необходимо перейти, вычисляются с помощью решения задачи обратной кинематики.

У данного подхода есть проблема практической реализации в связи с тем, что решение задачи обратной кинематики осуществляется численными методами, и каждая следующая точка траектории рассчитывается независимо от предыдущей. Это приводит в ряде случаев к значительному изменению углов поворота сочленений в последующих точках. Переход из

текущей точки в соседнюю с минимальным изменением положения конечного звена может давать значительное расхождение между углами поворотов сочленений в случаях, когда расчеты для следующей точки не связаны с предыдущей. Целесообразно в алгоритмах поиска углов использовать предыдущие значения углов поворота звеньев в виде начальных значений. В большинстве случаев данный путь позволяет получить плавные кривые изменения углов поворота в сочленениях.

Вычисление решений осложняется наличием ограничений различного рода. Ограничения можно разделить на два условных типа: физические (естественные) и расчетные. К физическим ограничениям относят предельные углы и скорости поворота сочленений. Предельные углы поворота обусловлены конструкцией манипулятора и связаны с областью его применения и способом передачи сигналов через проводные соединения. Предельные скорости обусловлены мощностью и характеристиками приводов. Для сочленений справедлива запись:

$$\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}, \quad (4)$$

где $\theta_{\min}$ – минимальные значения углов поворота сочленений; $\theta_{\max}$ – максимальные значения углов поворота сочленений. Ограничение скоростей запишем в виде:

$$v_{\min} \leq \frac{d\theta}{dt} \leq v_{\max}, \quad (5)$$

где $v_{\max}$ – максимальные скорости вращения сочленений звеньев; $v_{\min}$ – минимальные значения скоростей. Отрицательное значение скорости вращения означает вращение в обратную сторону, для некоторых типов приводов скорость вращения в одном из направлений отличается от инверсного. Для случая равных скоростей прямого и обратного хода справедлива запись:

$$\left| \frac{d\theta}{dt} \right| \leq v_{\max}.$$

Скорость движения манипулятора зависит от его физических параметров, таких как мощность приводов и масса звеньев. Таким образом, движение делится на три этапа: разгон, равномерное движение и торможение. В случае, если есть область, в которую нельзя попадать, следует предусмотреть не только ограничение скорости в момент попадания в запрещенную область, но и предусмотреть снижение скорости таким образом, чтобы манипулятор остановился, не достигнув запретной области.

Ограничения так же возникают в сочетаниях положений звеньев, при которых не весь диапазон физических углов может быть использован. Наличие зоны, в которую манипулятор не должен попадать создает

собственные ограничения диапазона углов поворота сочленений. Примером такого ограничения является ситуация, когда изменение угла поворота сочленения допустимо с учетом (4) и (5), но может привести к самостолкновениям.

На первый взгляд простой перевод текущих углов поворота к конечным углам поворота сочленений является решением поставленной задачи. В математическом плане такое утверждение верно. Но данный подход не учитывает возможного столкновения частей робота между собой. Подобные столкновения характерны для роботов с большим числом степеней свободы и малыми ограничениями на предельные углы поворота сочленений. Далее обозначим подобные критические состояния как самостолкновения манипулятора.

Задача движения с учетом ограничений. Столкновение может рассматриваться как критическое состояние при построении траектории перемещения манипулируемого объекта. Например, при обходе препятствия или при работе в ограниченной области. Дополнительной сложностью является возможное столкновение частей манипулятора с посторонними объектами в рабочей области. Под посторонними объектами мы поднимаем объекты, не являющиеся частью манипулятора.

В случае, если удалось построить траекторию движения рабочего органа манипулятора от начальной точки к конечной без столкновений, то нет гарантий, что прочие части манипулятора не столкнутся с объектами в рабочей области. Данную проблему отнесем к столкновениям прочих частей манипулятора в рабочей области.

Далее рассмотрим примеры задач управляемого перемещения груза из начальной точки в конечную с учетом ограничений. Постановка задачи в общем виде:

$$\begin{cases} p_n(t) \rightarrow B; t \rightarrow \infty \\ p_n(t) = A; t = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где $p_n(t)$ – координаты конечного n -го звена манипулятора, A, B – точки начала и конца траектории соответственно. Траектория, по которой пройдет конечный элемент (схват) в общем виде не указывается и рассчитывается при решении задачи перехода из начальной точки к конечной. В случае, если некоторая траектория, по которой должен пройти схват, известна заранее, то задача сводится к описываемой путем разбиения траектории на небольшие отрезки. Для каждого отрезка отдельно решается задача перехода из начальной точки в конечную.

Рассмотрим задачу предотвращения самостолкновений путем введения расчетных ограничений на примере трех задач: столкновение манипулятора с корпусом аппарата-носителя (базовым модулем),

столкновение переносимого груза с базовым модулем, столкновение частей манипулятора между собой.

Предотвращение столкновений манипулятора с базовым модулем запишем в виде ограничений, накладываемых на решение задачи движения (6). Известны координаты поверхности базового модуля, координаты начального положения схвата и конечная точка, в которой схват должен оказаться. Ставится задача исключения совпадения координат любого из звеньев манипулятора с координатами поверхности базового модуля. Поскольку каждое звено и сочленение имеет координату в виде материальной точки целесообразно задачу записывать в виде поиска минимального допустимого расстояния между точками. Таким образом можно учитывать геометрические размеры манипуляторов.

С учетом новой постановки задачи запишем ограничения в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} \rho(p_1, p_2) \geq S_b \\ \rho(p_1, p_3) \geq S_b \\ \vdots \\ \rho(p_1, p_n) \geq S_b \end{cases},$$

где $\rho(p_1, p_i)$ – функция, вычисляющая расстояние между двумя точками в пространстве по их координатам, p_i – точка в пространстве с координатами i -го сочленения, S_b – минимально допустимое расстояние между сочленениями манипулятора и базовым модулем. С учетом (2) запишем ограничения в общем виде:

$$\rho(p_1, {}^i A_{i+1}(\theta_{i+1})p_{i+1}) \geq S_b, \quad (7)$$

где $i = (2, 3 \dots n)$.

Таким образом, запись задачи (6) с учетом (4), (5), (7) позволяет находить перемещения манипулируемого объекта из начальной точки в конечную без повреждения базового модуля. Применение ограничений выполняется при численном решении задачи обратной динамики на каждом шаге поиска решения. Нарушение условия (7) является требованием к продолжению поиска решения.

Помимо столкновения частей манипулятора с базовым модулем достаточно распространенной ситуацией при работе может быть столкновение перемещаемого объекта с базовым модулем. Данная ситуация возникает по той причине, что размеры и форма переносимого груза не постоянны и заранее неизвестны. Наличие системы трехмерного зрения позволяет определить размеры перемещаемого объекта и на основании этих данных принять решение о безопасности движения. Для унификации полученных решений представим переносимый груз в виде сферы с центром

в точке схвата манипулятора и радиусом S_g . На основании этого условия предотвращения столкновения переносимого груза с базовым модулем примут вид:

$$\rho(p_1, {}^{n-1}A_n(\theta_n)p_n) \geq S_g.$$

С учетом этого запишем ограничения (7) в следующем виде:

$$\begin{cases} \rho(p_1, {}^iA_{i+1}(\theta_{i+1})p_{i+1}) \geq S_b \\ \rho(p_1, {}^{n-1}A_n(\theta_n)p_n) \geq S_g \end{cases}, \quad (8)$$

где $i = (2, 3, \dots, n-1)$. Система (8) является ограничениями, учет которых предотвращает повреждение базового модуля переносимым грузом (аналогично 7).

Заметим, что повреждение базового модуля при работе является не единственной возникающей проблемой. Отдельные части манипулятора так же могут повреждаться путем некорректных движений. Частично это можно предотвратить введением физических ограничений (4) и (5), что не исключает ситуации самостолкновения манипулятора без достижения предельных значений углов поворота и скоростей. Предотвращение столкновений частей манипулятора между собой может быть решено с помощью введения еще одного типа ограничений. Для этого необходимо на каждом шаге решения вычислять расстояния между сочленениями и сравнивать эти расстояния с разрешенными. В общем виде данная задача получается весьма сложной в вычислительном плане. Решение данной задачи осуществляется путем усовершенствования ограничений (8) и сравнения допустимого расстояния между грузом и каждым звеном манипулятора, а не только с базовым модулем. С учетом указанного запишем (8) в следующей форме:

$$\begin{cases} \rho({}^{i-1}A_i(\theta_i)p_i, {}^{j-1}A_j(\theta_j)p_j) \geq S_b \\ \rho({}^{i-1}A_i(\theta_i)p_i, {}^{n-1}A_n(\theta_n)p_n) \geq S_g \end{cases}, \quad (9)$$

где $i = (2, \dots, n)$, $j = (2, \dots, n)$. Полученные условия определяют безопасные расстояния между звеньями системы и между переносимым грузом и частями манипулятора.

Не следует забывать, что работа может усложняться наличием в рабочей области дополнительного манипулятора. В таком случае, решения, полученные для одиночного манипулятора, требуют корректировки. Мы рассматриваем второй манипулятор в виде динамического препятствия и предотвращаем столкновение аналогично (9) путем вычисления минимально допустимых расстояний.

Алгоритм решения задачи управления с учетом ограничений. Учитываются физические и вычислительные ограничения как способ

устранения критических состояний – столкновений различного вида. Указанные ограничения необходимы для усовершенствования алгоритмов решения задачи обратной кинематики. Одним из условий успешного нахождения решения является строгое соблюдение ограничений.

Итоговая работа системы сводится к следующему алгоритму:

1. Определение координат начальной и конечной точек схвата.
2. Расчет достижимости точек с учетом ограничений.
3. В случае возможности нахождения манипулятора в начальном и конечном положении поиск промежуточных точек траектории с учетом ограничений.
4. При отсутствии проблем, изменение углов поворота сочленений.

Продemonстрируем работу предлагаемого метода на примере решения задачи движения манипуляторов антропоморфного робототехнического комплекса SAR-400 с двумя шестизвенными манипуляторами. Моделирование выполнено в MatLab с использованием Robotic System toolbox. Начальное положение манипуляторов изображено на **Рис.1**. Левый манипулятор находится в рабочем положении и поднят вверх, а правый в начальном и опущен вниз.

Зададим конечную точку движения схвата правого манипулятора таким образом, чтобы она совпала с текущей точкой, в которой находится схват левого манипулятора – это гарантирует столкновение с возможным повреждением механизмов. На **Рис.2** изображен результат работы системы управления без учета ограничений. Мы видим пересечение двух манипуляторов. Такой результат получен в результате построения управления без учета ограничений (7) – (9).

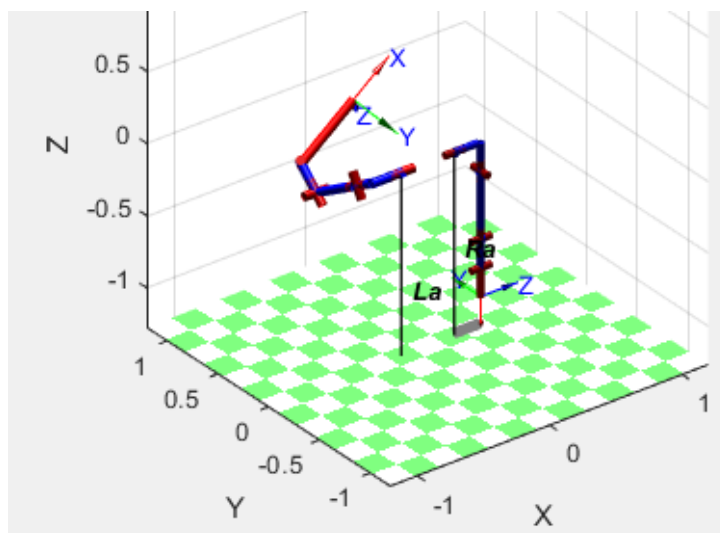


Рис.1 – Начальное положение манипуляторов

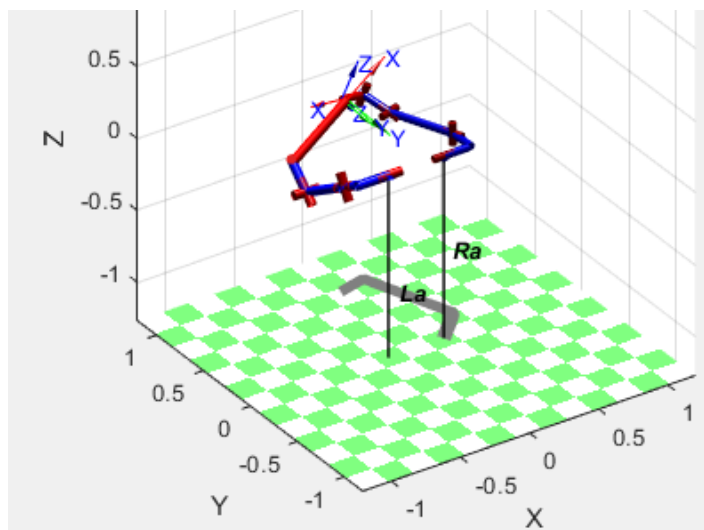


Рис.2 – Демонстрация столкновения двух манипуляторов

Зададим величины $S_b = 0.1$ (м), $S_g = 0.2$ (м) и решим задачу перехода правого манипулятора в точку, в которой находится схват левого манипулятора повторно. На **Рис.3** изображен результат работы системы управления. Видно, что манипуляторы не пересекаются и между ними есть расстояние, соответствующее величине $S_b + S_g = 0.3$ (м). Дальнейшее движение прекращено в виду того, что обнаружено нарушение одного из условий (9).

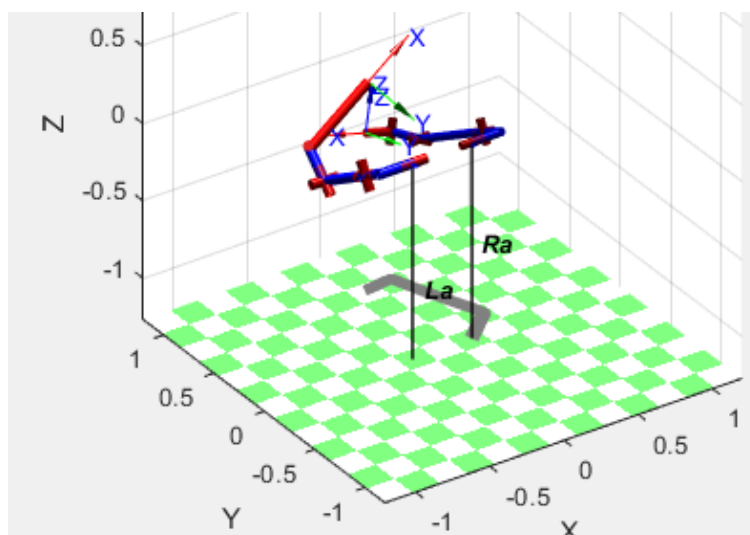


Рис.3 – Демонстрация работы алгоритма предотвращения столкновений двух манипуляторов

Построение траекторий, а также решение с использованием указанного алгоритма, не исключает возможность параллельного применения других методов контроля столкновений [4-6]. Возможно распространение на случай с несколькими манипуляторами [7].

Вывод. Выполнен анализ критических состояний, возникающих при управлении манипуляторами. Предложен способ прогнозирования появления критических состояний методом ограничений. Продемонстрирована работа алгоритма решения задачи управления с учетом ограничений.

Работы выполнены в рамках реализации гранта РФФИ и г. Севастополя №18-48-920022 р_а.

Библиографический список

1. Lewis F, Dawson D.M., Abdallah C T 2004 Robot manipulator control: theory and practice (New York, Marcel Dekker).
2. Kabanov A.A., Tokarev D.A. Collision detection and avoidance method for two cooperative robot manipulators / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 044021 IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/709/4/044021
3. Kabanov A.A., Tokarev D.A. Self-collision Avoidance Method for a Dual-arm Robot / 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS).
4. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами 2010: Труды научно-технической конференции-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р.Р. Назирова.— М. : КДУ, 2011.— 328 с. : табл., ил., цв. ил.
5. Миронов С. В., Юдин А. В. Система технического зрения в задачах навигации мобильных объектов // Программные продукты и системы. 2011. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-tehnicheskogo-zreniya-v-zadachah-navigatsii-mobilnyh-obektov> (дата обращения: 01.04.2020).
6. Костылев Даниил Анатольевич, Федотов Олег Васильевич Машинное зрение в робототехнических системах // Наука, техника и образование. 2016. №7 (25). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-zrenie-v-robototekhnicheskikh-sistemah> (дата обращения: 01.04.2020).
7. A Multi Objective Control Approach to Online Dual Arm Manipulation Petter Ögren, Christian Smith, +1 author Danica Kragic Published in SyRoCo 2012 DOI:10.3182/20120905-3-HR-2030.00032

Bibliograficheskiy spisok

1. Lewis F, Dawson D.M., Abdallah C T 2004 Robot manipulator control: theory and practice (New York, Marcel Dekker)
2. Kabanov A.A., Tokarev D.A. Collision detection and avoidance method for two cooperative robot manipulators / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 044021 IOP Publishing, doi: 10.1088 / 1757-899X / 709/4/044021

3. Kabanov A.A., Tokarev D.A. Self-collision Avoidance Method for a Dual-arm Robot / 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS).
4. Technical Vision in Mobile Object Management Systems 2010: Proceedings of the scientific and technical conference-seminar. Vol. 4 / Ed. R.R. Nazirova .-- Moscow: KDU, 2011 .-- 328 p. : tab., ill., col. Silt
5. Mironov S. V., Yudin A. V. The system of technical vision in the problems of navigation of mobile objects // Software products and systems. 2011. No1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-tehnicheskogo-zreniya-v-zadachah-navigatsii-mobilnyh-obektov> (accessed: 04/01/2020).
6. Kostylev Daniil Anatolevich, Fedotov Oleg Vasilievich Machine vision in robotic systems // Science, technology and education. 2016. No7 (25). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-zrenie-v-robototekhnicheskikh-sistemah>
7. A Multi Objective Control Approach to Online Dual Arm Manipulation Petter Ögren, Christian Smith, +1 author Danica KragicPublished in SyRoCo 2012 DOI:10.3182/20120905-3-HR-2030.00032 (accessed: 29/04/2020).

¹*Токарев Денис Александрович, канд. техн. наук, доц., Ведущий научный сотрудник НОЦ «Мехатроника и робототехника» tdanis@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Кабанов Алексей Александрович, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Информатика и управление в технических системах» patronne@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

ANALYSIS OF CRITICAL STATES OF MANIPULATORS AT AGREED WORK

D.A. Tokarev, A.A. Kabanov

The article discusses the problem of the operation of multi-link manipulators taking into account critical conditions that arise in the process of planning movements. It is proposed to solve the problem of controlling and preventing self-collisions by introducing restrictions in the task of controlling the movement of manipulators. The choice of constraints is performed to prevent damage to the manipulators and the loads carried by them.

Key words: critical state, coordinated work, robotic arm, self-collisions, control restrictions.

Denis Alexander Tokarev, Ph.D. tech. Sci., Assoc., Leading Researcher, REC "Mechatronics and Robotics" tdanis@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University"

Kabanov Alexey Alexandrovich, Ph.D. tech. Sci., Associate Professor, Head of the Department "Computer Science and Management in Technical Systems" patronne@mail.ru, Russia, Sevastopol, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University"

.

УДК 519.873

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ С МГНОВЕННО ПОПОЛНЯЕМЫМ РЕЗЕРВОМ ВРЕМЕНИ БЕЗ ПРЕКРАЩЕНИЯ ОБРАБОТКИ

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

Аннотация. Для повышения надежности и эффективности функционирования систем различного назначения используется временное резервирование. В данной работе построена полумарковская модель функционирования технологической ячейки с учетом наличия мгновенно пополняемого резерва времени. Полученная модель позволяет проводить анализ влияния резерва времени на производительность технологической ячейки.

Ключевые слова. Полумарковский процесс, резерв времени, технологическая ячейка, производительность.

Для обеспечения надежности и эффективности систем используется временное резервирование.

Временное резервирование [1-4] предоставляет системе в процессе функционирования возможность израсходовать некоторое дополнительное время (резерв времени) на восстановление работоспособности. Для систем с временным резервированием нарушение работоспособности системы не обязательно сопровождается отказом системы, так как имеется возможность восстановить работоспособность системы за резервное время.

Источниками резерва времени являются промежуточные склады, накопители, резервные источники энергии.

Одной из особенностей временного резервирования, которая определяет его достоинства, является то, что улучшение показателей эффективности системы часто не связано с увеличением количества оборудования и использованием дополнительных средств, а основано на введении или использовании запаса времени, доступного в самой системе.

В большинстве работ анализируется влияние резерва времени на надежность системы [1,2,4].

Целью данной работы является анализ влияния наличия мгновенно пополняемого резерва времени на производительность технологической ячейки.

Построена полумарковская модель технологической ячейки (ТЯ) с учетом времени обработки единицы продукции и наличия мгновенно

пополняемого временного резерва. Используя построенную модель, найдены формулы для производительности ТС.

Рассмотрим функционирование системы S , состоящей из ТЯ, обрабатывающей продукцию и имеющей мгновенно пополняемый резерв времени. В начальный момент времени ТЯ приступает к обработке продукции. Время обработки ТЯ единицы продукции – случайная величина (СВ) α_1 с функцией распределения (ФР) $F_1(t)$ и плотностью распределения (ПР) $f_1(t)$. Время безотказной работы ТЯ – СВ α_2 с ФР $F_2(t)$ и ПР $f_2(t)$. При наступлении неисправности ТЯ, начинается ее восстановление, время восстановления ТЯ – СВ β с ФР $G(t)$ и ПР $g(t)$. ТЯ имеет случайный резерв времени δ с ФР $R(t)$ и ПР $r(t)$. Отказ системы S наступает, если время восстановления ТЯ будет больше СВ δ и продолжается до восстановления ТЯ. При этом предполагается, что к моменту восстановления ТЯ резерв времени полностью пополняется. При наступлении неисправности ТЯ обработка единицы продукции продолжается до тех пор, пока время восстановления $\beta < \delta$, в противном случае ($\beta > \delta$) – обработка единицы продукции прекращается, а после восстановления ТЯ начинается обработка новой единицы продукции. Предполагается, что СВ α_1 , α_2 , β , δ независимы и имеют конечные математические ожидания.

Для описания функционирования системы S используем процесс Марковского восстановления $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ и соответствующий ему полумарковский процесс $\xi(t)$ с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний [4,5]. Введем следующее множество E полумарковских состояний системы:

$$E = \{1, 10x, 11x, 20x, 21xz, 21x, 1\bar{0}xz, 1\bar{1}xz, \omega x\}, \quad (1)$$

где z – величина оставшегося резерва времени.

Непрерывная компонента x указывает время, до следующего изменения состояния системы. Временная диаграмма функционирования системы представлена на **Рис.1**.

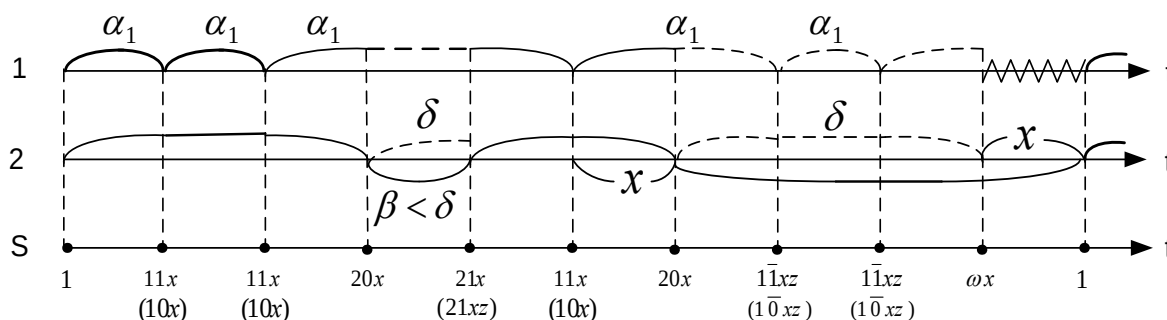


Рис.1 – Временная диаграмма функционирования системы

Значения кодов состояний следующие:

- 1 – начальное состояние системы: ТЯ приступает к работе, начинается обработка единицы продукции;
 10х (мгновенное состояние) – ТЯ продолжает работу, закончилась обработка единицы продукции;
 11х – ТЯ продолжает работу, начинается обработка новой единицы продукции;
 20х – начало восстановления ТЯ, обработка единицы продукции продолжается за счет резерва времени;
 21хz (мгновенное состояние) – ТЯ закончила восстановление, обработка единицы продукции продолжается;
 21х – ТЯ начинает работу, продолжается обработка новой единицы продукции;
 $\bar{1}0xz$ (мгновенное состояние) – ТЯ находится на восстановлении и продолжает функционировать за счет резерва времени, закончилась обработка единицы продукции;
 $\bar{1}\bar{1}xz$ – ТЯ находится на восстановлении и продолжает функционировать за счет резерва времени, началась обработка новой единицы продукции;
 ωx – отказ системы, резерв времени полностью исчерпан, обработка единицы продукции прекращается;
 х – время до следующей смены состояния, z – величина оставшегося резерва времени.

Определим вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n; n \geq 0\}$.

Возможны переходы:

$$\begin{aligned}
 p_1^{10x} &= \int_0^\infty f_2(x+t) f_1(t) dt, \quad p_1^{20x} = \int_0^\infty f_1(x+t) f_2(t) dt, \quad p_{10x}^{11x} = 1, \\
 p_{11x}^{10dy} &= f_1(x-y) dy, \quad 0 < y < x, \quad p_{11x}^{20dy} = f_1(x+y) dy, \quad y > 0, \\
 p_{20x}^{\bar{1}0ys} &= g(x+y) r(x+s), \quad y > 0, \quad s > 0, \\
 p_{20x}^{21ys} &= g(x-y) r(x-y+s), \quad 0 < y < x, \quad s > 0, \\
 p_{20x}^{10y} &= \int_0^x g(y+t) r(t) dt, \quad y > 0, \quad p_{21x}^{10dy} = f_2(x+y) dy, \quad y > 0, \quad p_{\omega x}^1 = 1, \\
 p_{21x}^{20dy} &= f_2(x-y) dy, \quad 0 < y < x, \quad p_{\bar{1}0xz}^{1\bar{1}xz} = 1, \quad p_{\bar{1}\bar{1}xz}^{1\bar{0}x-tz-t} = f_1(t), \quad 0 < t < z, \quad z < x, \\
 p_{\bar{1}\bar{1}xz}^{\omega x-z} &= \bar{F}_1(z), \quad z < x, \quad p_{\bar{1}\bar{1}xz}^{1\bar{0}x-tz-t} = f_1(t), \quad 0 < t < x, \quad x < z, \\
 p_{\bar{1}\bar{1}xz}^{21yz-x} &= f_1(x+y), \quad y > 0, \quad x < z.
 \end{aligned}$$

Для определения производительности системы найдем стационарное распределение ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$.

Предположим, что у стационарного распределения ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ существуют плотности $\rho(1)$, $\rho(10x)$, $\rho(11x)$, $\rho(20x)$, $\rho(21x)$, $\rho(21xz)$, $\rho(1\bar{0}xz)$, $\rho(1\bar{1}xz)$, $\rho(\omega x)$.

Система интегральных уравнений для стационарного распределения ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(1) = \int_0^\infty \rho(\omega x) dx, \\ \rho(10x) = \rho(1) \int_0^\infty f_2(x+t) f_1(t) dt + \int_x^\infty \rho(11y) f_1(y-x) dy + \int_0^\infty \rho(21y) f_2(x+y) dy, \\ \rho(11x) = \rho(10x), \\ \rho(20x) = \rho(1) \int_0^\infty f_1(x+t) f_2(t) dt + \int_0^\infty \rho(11y) f_1(x+y) dy + \int_x^\infty \rho(21y) f_2(y-x) dy, \\ \rho(21x) = \int_x^\infty \rho(20y) g(y-x) \bar{R}(y-x) dy + \int_0^\infty dy \int_y^\infty \rho(1\bar{1}yz) f_1(x+y) dz, \\ \rho(21xz) = \int_x^\infty \rho(20y) g(y-x) r(y-x+z) dy + \int_0^\infty \rho(1\bar{1}t z+t) f_1(x+y) dt, \\ \rho(1\bar{0}xz) = \int_0^\infty \rho(1\bar{1}x+t z+t) f_1(t) dt + \int_0^\infty \rho(20y) g(y+x) r(y+z) dy, \\ \rho(1\bar{1}xz) = \rho(1\bar{0}xz), \\ \rho(\omega x) = \int_0^\infty \rho(20y) dy \int_0^y g(x+t) r(t) dt + \int_0^\infty \rho(1\bar{1}x+t t) \bar{F}_1(t) dt, \\ \text{условие нормировки.} \end{array} \right. \quad (2)$$

Введем обозначения:

$$\rho(10x) = \rho(11x) = \varphi_1(x), \quad \rho(20x) = \varphi_2(x), \quad \rho(21x) = \varphi_3(x),$$

$$\rho(1\bar{1}xz) = \rho(1\bar{0}xz) = \varphi_4(x, z), \quad \rho(\omega x) = \varphi_5(x), \quad \rho(1) = \rho_0, \quad \rho(21x) = \int_0^\infty \rho(21xz) dz.$$

Тогда система уравнений (2) принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 = \int_0^{\infty} \varphi_5(x) dx, \\ \varphi_1(x) = \rho_0 \int_0^{\infty} f_2(x+t) f_1(t) dt + \int_x^{\infty} \varphi_1(y) f_1(y-x) dy + \int_0^{\infty} \varphi_3(y) f_2(x+y) dy, \\ \varphi_2(x) = \rho_0 \int_0^{\infty} f_1(x+t) f_2(t) dt + \int_0^{\infty} \varphi_1(y) f_1(x+y) dy + \int_x^{\infty} \varphi_3(y) f_2(y-x) dy, \\ \varphi_3(x) = \int_x^{\infty} \varphi_2(y) g(y-x) \bar{R}(y-x) dy + \int_0^{\infty} dy \int_y^{\infty} \varphi_4(y,z) f_1(x+y) dz, \\ \varphi_3(x) = \int_x^{\infty} \varphi_2(y) g(y-x) \bar{R}(y-x) dy + \int_0^{\infty} f_1(x+y) dy \int_y^{\infty} \varphi_4(y,z) dz, \\ \varphi_4(x,z) = \int_0^{\infty} \varphi_4(x+t, z+t) f_1(t) dt + \int_0^{\infty} \varphi_2(y) g(y+x) r(y+z) dy, \\ \varphi_5(x) = \int_0^{\infty} \varphi_2(y) dy \int_0^y g(x+t) r(t) dt + \int_0^{\infty} \varphi_4(x+t, t) \bar{F}_1(t) dt, \\ + \text{условие нормировки.} \end{array} \right. \quad (3)$$

Найдем решение системы (3). Введем оператор:

$$(A_{f_1} \varphi)(x, z) = \int_0^{\infty} \varphi(x+t, z+t) f_1(t) dt,$$

тогда 5-ое уравнение системы (3) запишется в виде:

$$\varphi_4 = A_{f_1} \varphi_4 + \int_0^{\infty} \varphi_2(y) g(y+x) r(y+z) dy, \quad (I - A_{f_1}) \varphi_4 = \int_0^{\infty} \varphi_2(y) g(y+x) r(y+z) dy,$$

$$\varphi_4 = (I - A_{f_1})^{-1} \left(\int_0^{\infty} \varphi_2(y) g(y+x) r(y+z) dy \right), \quad (I - A_{f_1})^{-1} = I + \sum_{n=1}^{\infty} A_{f_1}^n,$$

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} A_{f_1}^n \right) \varphi = \int_0^{\infty} \varphi(x+t, z+t) h_{f_1}(t) dt, \quad h_{f_1}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_1^{*(n)}(t) \quad - \text{плотность функции}$$

восстановления $H_{f_1}(t)$ процесса восстановления, порожденного СВ α_1 .

$$\text{Введем функцию } v(t, x) = f(t+x) + \int_0^t f(t+x-u) h(u) du.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}\varphi_4(x, z) &= \int_0^\infty \varphi_2(y) g(y+x) r(y+z) dy + \int_0^\infty h_{f_1}(t) dt \int_0^\infty \varphi_2(y) g(y+x+t) r(y+z+t) dy = \\ &= \int_0^\infty \varphi_2(y) g(y+x) r(y+z) dy + \int_0^\infty \varphi_2(y) dy \int_0^\infty g(y+x+t) r(y+z+t) h_{f_1}(t) dt.\end{aligned}\quad (4)$$

Тогда

$$\int_y^\infty \varphi_4(y, z) dz = \int_0^\infty \varphi_2(t) \bar{R}(t+y) g(t+y) dt + \int_0^\infty \varphi_2(s) ds \int_0^\infty \bar{R}(y+s+t) g(y+s+t) h_{f_1}(t) dt.$$

Подставляя $\varphi_4(x, z)$ в 4-е уравнение системы (2), получаем

$$\begin{aligned}\varphi_3(x) &= \int_x^\infty \bar{R}(y-x) g(y-x) \varphi_2(y) dy + \int_0^\infty f_1(x+y) dy \int_0^\infty \varphi_2(t) \bar{R}(y+t) g(y+t) dt + \\ &+ \int_0^\infty f_1(x+y) dy \int_0^\infty \varphi_2(s) ds \int_0^\infty \bar{R}(y+s+t) g(y+s+t) h_{f_1}(t) dt.\end{aligned}$$

После преобразований получаем

$$\varphi_3(x) = \int_x^\infty \bar{R}(y-x) g(y-x) \varphi_2(y) dy + \int_0^\infty \varphi_2(y) dy \int_0^\infty \bar{R}(y+t) g(y+t) v_{f_1}(t, x) dt. \quad (5)$$

Рассмотрим второе уравнение системы (3):

$$\varphi_1(x) = \rho_0 \int_0^\infty f_2(x+t) f_1(t) dt + \int_x^\infty \varphi_1(y) f_1(y-x) dy + \int_0^\infty \varphi_3(y) f_2(x+y) dy.$$

Введем оператор $[A_{f_1} \varphi](x) = \int_x^\infty f_1(y-x) \varphi(y) dy$,

тогда второе уравнение системы запишется в виде:

$$\varphi_1(x) = \rho_0 \int_0^\infty f_2(x+t) f_1(t) dt + A_{f_1} \varphi_1 + \int_0^\infty \varphi_3(y) f_2(x+y) dy.$$

Тогда

$$\begin{aligned}\varphi_1(x) &= \rho_0 \int_0^\infty f_2(x+t) f_1(t) dt + \int_0^\infty \varphi_3(y) f_2(x+y) dy + \\ &+ \rho_0 \int_x^\infty h_{f_1}(y-x) dy \int_0^\infty f_2(y+t) f_1(t) dt + \int_x^\infty h_{f_1}(y-x) dy \int_0^\infty \varphi_3(t) f_2(y+t) dt.\end{aligned}$$

После преобразования слагаемых, входящие в выражение для $\varphi_1(x)$, получаем:

$$\begin{aligned}\varphi_1(x) &= \rho_0 \int_0^{\infty} f_2(x+t)h_{f_1}(t)dt + \int_0^{\infty} \varphi_3(y)f_2(x+y)dy + \int_x^{\infty} h_{f_1}(y-x)dy \int_0^{\infty} \varphi_3(t)f_2(y+t)dt = \\ &= \rho_0 \int_0^{\infty} f_2(x+t)h_{f_1}(t)dt + \int_0^{\infty} \varphi_3(y)f_2(x+y)dy + \int_0^{\infty} \varphi_3(t)dt \int_x^{\infty} h_{f_1}(y-x)f_2(y+t)dy.\end{aligned}\quad (6)$$

Рассмотрим третье уравнение системы (3)

$$\varphi_2(x) = \rho_0 \int_0^{\infty} f_1(x+t)f_2(t)dt + \int_0^{\infty} \varphi_1(y)f_1(x+y)dy + \int_x^{\infty} \varphi_3(y)f_2(y-x)dy.$$

Подставим в него выражение, полученное для $\varphi_1(y)$.

$$\begin{aligned}\varphi_2(x) &= \rho_0 \int_0^{\infty} f_1(x+t)f_2(t)dt + \rho_0 \int_0^{\infty} f_1(x+y)dy \int_0^{\infty} f_2(y+t)h_{f_1}(t)dt + \\ &+ \int_0^{\infty} f_1(x+y)dy \int_0^{\infty} \varphi_3(t)f_2(y+t)dt + \int_0^{\infty} f_1(x+y)dy \int_0^{\infty} \varphi_3(t)dt \int_y^{\infty} h_{f_1}(s-y)f_2(s+t)ds + \\ &+ \int_x^{\infty} \varphi_3(y)f_2(y-x)dy.\end{aligned}$$

Преобразуя слагаемые, входящие в выражение для $\varphi_2(x)$, получим

$$\varphi_2(x) = \rho_0 \int_0^{\infty} f_2(t)v_{f_1}(t,x)dt + \int_0^{\infty} \varphi_3(t)dt \int_0^{\infty} f_2(t+y)v_{f_1}(y,x)dy + \int_x^{\infty} \varphi_3(y)f_2(y-x)dy. \quad (7)$$

Рассмотрим

$$\begin{cases} \varphi_3(x) = \int_x^{\infty} \bar{R}(y-x)g(y-x)\varphi_2(y)dy + \int_0^{\infty} \varphi_2(y)dy \int_0^{\infty} \bar{R}(y+t)g(y+t)v_{f_1}(t,x)dt, \\ \varphi_2(x) = \rho_0 \int_0^{\infty} f_2(t)v_{f_1}(t,x)dt + \int_0^{\infty} \varphi_3(t)dt \int_0^{\infty} f_2(t+y)v_{f_1}(y,x)dy + \int_x^{\infty} \varphi_3(y)f_2(y-x)dy. \end{cases}$$

Введем функцию $\pi(x,y) = \int_0^{\infty} \bar{R}(y+t)g(y+t)v_{f_1}(t,x)dt$.

$$\begin{cases} \varphi_3(x) = \int_x^{\infty} \bar{R}(y-x)g(y-x)\varphi_2(y)dy + \int_0^{\infty} \varphi_2(y)\pi(x,y)dy, \\ \varphi_2(x) = \rho_0 \int_0^{\infty} f_2(t)v_{f_1}(t,x)dt + \int_0^{\infty} \varphi_3(t)dt \int_0^{\infty} f_2(t+y)v_{f_1}(y,x)dy + \int_x^{\infty} \varphi_3(y)f_2(y-x)dy. \end{cases} \quad (8)$$

Подставим первое уравнение системы (8) во второе

$$\varphi_3(x) = \int_0^{\infty} \bar{R}(y)g(y)\varphi_2(y+x)dy + \int_0^{\infty} \varphi_2(y)\pi(x,y)dy,$$

$$\varphi_3(t) = \int_0^\infty \bar{R}(s)g(s)\varphi_2(s+t)ds + \int_0^\infty \varphi_2(s)\pi(t,s)ds.$$

Подставим $\varphi_3(t)$ во второе уравнение системы (8), получим

$$\begin{aligned} \varphi_2(x) = & \rho_0 \int_0^\infty f_2(t)v_{f_1}(t,x)dt + \int_0^\infty v_{f_1}(y,x)dy \int_0^\infty f_2(y+t)dt \int_0^\infty \bar{R}(s)g(s)\varphi_2(s+t)ds + \\ & + \int_0^\infty v_{f_1}(y,x)dy \int_0^\infty f_2(y+t)dt \int_0^\infty \varphi_2(s)\pi(t,s)ds + \int_x^\infty f_2(t-x)dt \int_0^\infty \bar{R}(s)g(s)\varphi_2(s+t)ds + \\ & + \int_x^\infty f_2(t-x)dt \int_0^\infty \varphi_2(s)\pi(t,s)ds. \end{aligned} \quad (9)$$

Преобразуем слагаемые $\varphi_2(x)$ и введем следующие функции

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}(x,s) = & \int_0^\infty v_{f_1}(y,x)dy \int_0^s f_2(y+t)\bar{R}(s-t)g(s-t)dt + \\ & + \int_0^\infty v_{f_1}(y,x)dy \int_0^\infty f_2(y+t)\pi(t,s)dt + \int_x^\infty f_2(t-x)\pi(t,s)dt, \end{aligned}$$

$$T(x) = \left[(\bar{R} \cdot g) * f_2 \right](x), \text{ и оператор } (\Gamma_T \varphi)(x) = \int_x^\infty T(s-x)\varphi(s)ds.$$

Тогда предыдущее уравнение запишется в виде:

$$\varphi_2(x) = \rho_0 \int_0^\infty f_2(t)v_{f_1}(t,x)dt + \Gamma_T \varphi_2 + \int_0^\infty \tilde{\gamma}(x,t)\varphi_2(t)dt.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \varphi_2(x) = & \rho_0 \int_0^\infty f_2(t)v_{f_1}(t,x)dt + \int_0^\infty \tilde{\gamma}(x,t)\varphi_2(t)dt + \rho_0 \int_x^\infty h_T(y-x)dy \int_0^\infty f_2(t)v_{f_1}(t,y)dt + \\ & + \int_x^\infty h_T(y-x)dy \int_0^\infty \tilde{\gamma}(y,t)\varphi_2(t)dt. \end{aligned} \quad (10)$$

Введем функцию

$$\tilde{\tilde{\gamma}}(x,t) = \tilde{\gamma}(x,t) + \int_x^\infty h_T(y-x)\tilde{\gamma}(y,t)dy = \tilde{\gamma}(x,t) + \int_x^\infty h_T(y)\tilde{\gamma}(y+x,t)dy$$

$$\text{и оператор } (\Gamma_{\tilde{\tilde{\gamma}}} \varphi)(x) = \int_0^\infty \tilde{\tilde{\gamma}}(x,t)\varphi(t)dt.$$

Тогда уравнение (10) запишется в виде:

$$\varphi_2(x) = \rho_0 \int_0^\infty f_2(t)v_{f_1}(t,x)dt + \rho_0 \int_x^\infty h_T(y-x)dy \int_0^\infty f_2(t)v_{f_1}(t,y)dt + \Gamma_{\tilde{\tilde{\gamma}}} \varphi_2, \quad (11)$$

$$\begin{aligned}\varphi_2(x) &= \rho_0 \left(\int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, x) dt + \int_x^\infty h_T(y - x) dy \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, y) dt \right) + \Gamma_{\tilde{\gamma}} \varphi_2, \\ \varphi_2(x) &= \rho_0 \left(I + \sum_{n=1}^\infty \Gamma_{\tilde{\gamma}}^n \right) \left[\int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, x) dt + \int_x^\infty h_T(y - x) dy \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, y) dt \right], \\ \left(I + \sum_{n=1}^\infty \Gamma_{\tilde{\gamma}}^n \varphi \right)(x) &= \int_0^\infty \tilde{\pi}(x, y) \varphi(y) dy, \quad \tilde{\pi}(x, y) = \sum_{n=1}^\infty \tilde{\gamma}^{(n)}(x, y), \\ \tilde{\gamma}^{(n)}(x, y) &= \int_0^\infty \tilde{\gamma}^{(n-1)}(x, t) \tilde{\gamma}(t, y) dt, \quad \tilde{\gamma}^{(1)}(x, y) = \tilde{\gamma}(x, y).\end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}\varphi_2(x) &= \rho_0 \left[\int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, x) dt + \int_x^\infty h_T(y - x) dy \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, y) dt + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^\infty \tilde{\pi}(x, y) dy \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, y) dt + \int_0^\infty \tilde{\pi}(x, y) dy \int_y^\infty h_T(s - y) ds \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, s) dt \right], \quad (12) \\ \varphi_2(x) &= \rho_0 \Psi(x), \\ \Psi(x) &= \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, x) dt + \int_x^\infty h_T(y - x) dy \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, y) dt + \\ &\quad + \int_0^\infty \tilde{\pi}(x, y) dy \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, y) dt + \int_0^\infty \tilde{\pi}(x, y) dy \int_y^\infty h_T(s - y) ds \int_0^\infty f_2(t) v_{f_1}(t, s) dt.\end{aligned}$$

Зная $\varphi_2(x)$, можно найти решение системы уравнений (3), последовательной подстановкой.

В качестве примера рассмотрим случай, когда время обработки ТЯ единицы продукции, время безотказной работы ТЯ, время восстановления ТЯ имеют экспоненциальное распределение с функциями распределения $F_1(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t}$, $F_2(t) = 1 - e^{-\lambda_2 t}$, $G(t) = 1 - e^{-\mu t}$. Резерв времени является случайным и имеет экспоненциальное распределение с ФР $R(t) = 1 - e^{-ht}$.

Тогда решение системы (2) принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(1) = \rho_0, \\ \rho(11x) = \rho(10x) = \varphi_1(x) = \rho_0 \frac{\lambda_1(h + \mu)}{h} e^{-\lambda_2 x}, \\ \rho(10x) = \varphi_2(x) = \rho_0 \frac{\lambda_1(h + \mu)}{h} e^{-\lambda_1 x}, \\ \rho(1\bar{1}xz) = \rho(1\bar{0}xz) = \varphi_4(x, z) = \rho_0 \lambda_1 \mu e^{-\mu x} e^{-hz}, \\ \rho(21xz) = \rho_0 \lambda_1 \mu e^{-\lambda_1 x} e^{-hz}, \\ \rho(21x) = \varphi_3(x) = \rho_0 \frac{\lambda_1 \mu}{h} e^{-\lambda_1 x}, \\ \rho(\omega x) = \varphi_5(x) = \rho_0 \mu e^{-\mu x}, \end{array} \right.$$

Для нахождения производительности технологической ячейки $\Pi_{ТЯ}$ воспользуемся формулой, полученной в [6]:

$$\Pi_{ТЯ} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N_A(t)}{t} = \frac{\int_A \rho(dx)}{\int_E m(x) \rho(dx)}, \quad (13)$$

где $\rho(dx)$ – стационарное распределение ВЦМ; $m(x)$ – средние времена пребывания полумарковского процесса в состояниях; $N_A(t)$ – число попаданий полумарковского процесса в подмножество состояний $A = \{10x, 1\bar{0}xz\}$.

При попадании полумарковского процесса в состояния этого подмножества происходит окончание обработки единицы продукции.

Тогда

$$\Pi_{ТЯ} = \frac{\lambda_1 \mu (\lambda_2 + \mu + h)}{(\lambda_2 + \mu)(\mu + h)}. \quad (14)$$

Полученные результаты можно использовать для анализа влияния резерва времени на производительность при различных законах распределения параметров системы и видах резерва времени. Они могут быть использованы для определения оптимальной величины резерва времени.

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

Библиографический список

1. Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью. – Москва: Сов. Радио, 1974. – 296 с.

2. Креденцер Б.П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью. – Киев: Наук. Думка, 1978. – 240 с.
3. Ushakov I.A. Probabilistic Reliability Models. – Wiley, 2012. – 244 p.
4. Копп, В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. – 284 с.
5. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – К.: Наук. Думка, 1982. – 236 с.
6. Шуренков, В. М. Эргодические процессы Маркова. — М.: Наука, 1989. — 336 с.

Bibliograficheskij spisok

1. CHerkesov G.N. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem s vremennoj izbytochnost'yu. – Moskva: Sov. Radio, 1974. – 296 s.
2. Kredencer B.P. Prognozirovanie nadezhnosti sistem s vremennoj izbytochnost'yu. – Kiev: Nauk. Dumka, 1978. – 240 s.
3. Ushakov I.A. Probabilistic Reliability Models. – Wiley, 2012. – 244 p.
4. Kopp, V.YA. Stohasticheskie modeli avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s vremennym rezervirovaniem / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. – Sevastopol': Izd-vo SevGTU, 2000. – 284 s.
5. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem. – K.: Nauk. Dumka, 1982. – 236 s.
6. SHurenkov, V. M. Ergodicheskie processy Markova. — М.: Nauka, 1989. — 336 s.

¹Обжерин Юрий Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., objsev@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

²Сидоров Станислав Михайлович, ст. преподаватель, haeves@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

³Никитин Михаил Михайлович, ассистент, m.nikitin.1979@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

*PRODUCTIVITY OF A TECHNOLOGICAL CELL WITH
INSTANTANEOUSLY REPLENISHED TIME RESERVE WITHOUT
TERMINATION OF PROCESSING*

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

Temporary redundancy is used to improve the reliability and efficiency of systems for various purposes. In this work, a semi-markov model of the operation of the technological cell has been built, taking into account the availability of an instantly replenished time reserve. The resulting model allows you to analyze the impact of time reserve on performance.

Key words: Semi-Markov process, time reserve, technological cell, productivity.

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

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК И АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

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

Аннотация. *Исследуется механосборочное производство, с целью учета механизма влияния технологической наследственности на надежность резьбовых соединений в изделиях машиностроения на этапах их жизненного цикла. Предлагается методология исследования механосборочного производства, позволяющая применить полумарковские модели для определения характеристик его производительности и надежности, с учетом проявления технологической наследственности. Рассматривается надежность технологических процессов в механосборочном производстве, в частности, параметрические отказы при изготовлении деталей с резьбой и сборке резьбовых соединений. Для формализации описания механосборочного производства предлагается применить методы экспертных оценок и анализа иерархий. Предлагаемая методология позволяет учесть стохастичность технологических процессов на этапах жизненного цикла изделий машиностроения.*

Ключевые слова. *Механосборочное производство, метод анализа иерархий, метод экспертных оценок.*

Анализ исследований и публикаций. Устойчивым трендом развития современного машиностроения является рост требований к потребительским свойствам продукции, в т.ч. к надежности, на которую значительное влияние оказывает качество изготовления деталей с резьбой и резьбовых соединений (РС) [1,2]. Учитывая большую сложность, иерархическую организацию и многосвязность механосборочного производства и, в частности, процесса изготовления РС, целесообразно применение системного подхода к анализу взаимосвязи и взаимовлияния всех составляющих качества соединений.

Надежность деталей с резьбой, входящих в состав РС, исследована, в частности, в [3,4] и других публикациях, но рекомендации по предотвращению отказов изделий машиностроения (ИМ) в процессе эксплуатации пока не разработаны. Наиболее широко в высоконагруженных РС в ИМ применяются детали с наружными и внутренними метрическими резьбами М6...М20 с мелким шагом. Как показано в [3–7], решающее влияние на геометрические характеристики резьбовых деталей (РД) оказывает не только процесс формирования резьбы, но и предыдущие этапы их жизненного цикла, начиная с проектирования. Высокоэффективным способом получения наружных резьб (НР) в серийном

и массовом производстве является накатывание на двухроликовых станках [3,4], в процессе которого происходит упрочнение резьбовой поверхности при пластическом деформировании, существенно повышающее механические характеристики деталей. Вместе с тем, технологическая наследственность [1,5,7] на операции накатывания НР проявляется в наследовании негативных признаков от предыдущих этапов технологического процесса, а также в воспроизведении на резьбовых деталях (РД) дефектов, имеющих на рабочей поверхности резьбонакатных роликов. В большинстве публикаций [1,4,6] и др. стохастический характер всех процессов в механосборочном производстве отражен не в полной мере, что снижает достоверность получаемых результатов.

Цель исследований. Создание методологии анализа механосборочного производства, основанной на совместном применении методов экспертных оценок и анализа иерархий, а также полумарковских моделей, позволяющих определять характеристики его производительности и надежности, с учетом проявления технологической наследственности.

Изложение основного материала. Модель обеспечения качества РС, с учетом технологического наследования, может быть представлена следующим образом:

$$A_i \rightarrow B_j \rightarrow C_k \rightarrow Y_l \rightarrow G_s, \quad (1)$$

где $A_i, i = \overline{1, n}$ – совокупность n различных конструктивных параметров деталей и других компонентов, сформированная на этапе проектирования РС в составе ИМ; $B_j, j = \overline{1, m}$ – система m случайных величин (СВ) (технологических, физических и других параметров, характеризующих процессы, происходящие при получении и обработке материалов, заготовок, деталей, входящих в состав РС) $C_k, k = \overline{1, v}$ – система v СВ, характеризующих параметры деталей, поступающие на сборку РС; $Y_l, l = \overline{1, r}$ – система r случайных величин, характеризующих параметры процесса сборки и затяжки РС; $G_s, s = \overline{1, f}$ – совокупность f СВ, характеризующих параметры собранного и затянутого РС, наиболее существенные среди которых – величина натяжения стержня болта (шпильки), неравномерность затяжки в групповом РС и др. В зависимости от особенностей конструкции, функционального назначения и применяемой технологии сборки РС, количество и свойства СВ, входящих в (1), могут существенно изменяться. Стрелками в (1) обозначена не только последовательность основных этапов жизненного цикла РС в составе ИМ, но и передача наследственной информации между ними. К множеству параметров исходных сборочных компонентов для изготовления РС следует отнести размерную точность, шероховатость, вид покрытия, класс прочности деталей с резьбой,

механические характеристики сопрягаемых деталей, технологические возможности оборудования и оснастки, правильность его настройки, а также используемых средств контроля параметров качества и др. Среди множества промежуточных параметров сборочных единиц целесообразно выделить точность ориентации и позиционирования, а также надежность и стабильность стадии наживления и свинчивания.

В качестве выходных параметров стохастического процесса сборки и затяжки РС могут рассматриваться математические ожидания полученных контролируемых величин крутящего момента, угла поворота и удлинения стержня, а также их дисперсии, но наиболее информативными являются функции распределения указанных случайных величин [12–15].

Для системного анализа жизненного цикла РС необходимо рассмотреть не только производственные этапы, но также стадии предпроектного анализа и проектирования, конструкторско-технологической подготовки производства, приемо-сдаточных испытаний, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта [5,6]. Процесс формирования качества РС может быть формализован в виде структуры, отражающей взаимосвязь отдельных этапов (стадий), (Рис.1):

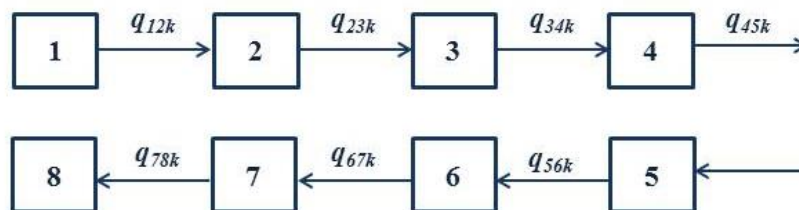


Рис.1 – Структура процесса формирования качества резьбового соединения на 1-8 этапах его жизненного цикла: q_{ijk} - вероятность передачи наследственной информации k -го вида между i -м и j -м этапами

На Рис.1 цифрами обозначены: 1 – стадия предпроектного анализа и проектирования, на которой происходит первоначальное формирование массивов геометрической и технологической информации; 2 – стадия конструкторско-технологической подготовки производства, содержание и объем которой определяется условиями эксплуатации РС, при этом используются имеющиеся и формируются новые массивы геометрической и технологической информации; 3 – стадия изготовления компонентов, входящих в РС, перенос на них геометрической и технологической информации; 4 – стадия технического контроля компонентов РС перед сборкой (как правило, осуществляется выборочно) и технологическая подготовка сборочных операций, формирование информации для настройки ручного и автоматизированного резьбосборочного оборудования; 5 – стадия сборки, в ходе которой вся информация от четырех предыдущих этапов переносятся на собираемое РС, в это время реализуется контроль затяжки

РС (активный или пассивный); 6 — приемосдаточные испытания (сплошные либо выборочные), по их результатам изделие (узел) может быть возвращено для разборки, диагностики и ликвидации дефектов; 7 — стадия эксплуатации, включая техническое обслуживание и оперативную диагностику состояния РС; 8 — стадия восстановлений в процессе эксплуатации, в т.ч. с заменой деталей. В реальных условиях механосборочного производства отдельные стадии процесса формирования качества могут быть дополнены, сокращены либо объединены с предшествующими и (или) последующими.

Процесс формирования качества РС можно рассматривать как единую систему взаимосвязанных материальных и информационных потоков (**Рис.2**). Ее составляют пять входных потоков: соединяемые детали 1 (корпуса, крышки, фланцы, прокладки и др. элементы, входящие в РС), РД 2 (болты, шпильки, гайки, резьбовые отверстия в корпусных деталях и др. элементы с резьбовыми поверхностями); совокупность силовых воздействий 3, осуществляемых при свинчивании и затяжке 3, информационный поток 4, совокупность контрольно-измерительных воздействий 5, а также выходной поток 6 готовых РС, обладающих определенными показателями качества.



Рис.2 – Системно – структурная модель процесса формирования качества РС

Одним из важнейших факторов, влияющих на качество РС, является корректное формирование требований к нему на этапе №1 (**Рис.1**). Перенос информации, содержащей требования к качеству РС на готовое изделие (или узел) начинается на этапе №2, что сопровождается неизбежными искажениями ее из-за вариации размеров РД и сопрягаемых деталей (даже в пределах установленных допусков). На этапах №3 и №4 (при подготовке и выполнении операций сборки РС), также происходят искажения исходной информации из-за случайных и систематических погрешностей. Из этого следует, что качественные параметры РС будут зависеть от того, с какой точностью исходная информация 2 будет перенесена на готовое изделие

(Рис.2). При этом совокупность 3 силовых воздействий (Рис.2) оказывает не менее существенное влияние на процесс переноса, особенно при изготовлении и сборке РС (этап №4).

Системный подход, применительно к проблеме обеспечения качества РС, предполагает: декомпозицию погрешностей на этапах (стадиях) жизненного цикла на отдельные элементы, выявление и изучение связей и отношений между этими элементами и суммарной погрешностью, возникающей при сборке.

На стадии проектирования возникает группа погрешностей Δ_{np} , вызванных недостаточной точностью исходных данных и приближенным характером расчетных зависимостей. При проектировании операций сборки РС, их надежность при эксплуатации характеризуют стабильностью создания усилия затяжки (Q_3), а также прочностными показателями [4,6]. Такой подход не учитывает стохастический характер формирования усилия затяжки и его возможные вариации, а также неопределенность зависимости между усилием затяжки и фактическим значением натяжения стержня детали с НР (болта либо шпильки). Существующий подход не учитывает реальное изменение величины натяжения стержня при эксплуатации РС, что определяет его надежность.

Примем в качестве системы нормируемых показателей качества одиночного РС напряжение σ_3 в стержне болта (либо шпильки), возникающее после завершения затяжки и определяемое по методике [6], а также минимум снижения величины σ_3 через некоторый интервал времени эксплуатации $t_э$ либо хранения $t_{хр}$ ИМ:

$$\begin{cases} \sigma_3 = \nu(Q_3/F_1)(1-\chi) \\ \sigma_3 - \sigma_3(t) \rightarrow \min \end{cases} \quad (2)$$

где ν — коэффициент запаса по плотности стыка, ($\nu=1,25\div 2$ при постоянных нагрузках, $\nu=2,5\div 4$ при переменных нагрузках); χ — коэффициент основной нагрузки, $\chi = \lambda_d / (\lambda_6 + \lambda_d) \approx 0,2 - 0,4$; F_1 — площадь поперечного сечения болта (шпильки) по внутреннему диаметру [6]. По условиям герметичности стыков, коэффициенты запаса принимают [6]: $\nu = 1,25\div 2,5$ при использовании «мягких» прокладок, $\nu = 2,5\div 3,5$ при использовании плоских металлических и комбинированных прокладок, например, в РС головки цилиндров с блоком цилиндров в двигателе внутреннего сгорания; $\sigma_3(t)$ — фактическое значение напряжения в стержне болта (шпильки) в момент времени t . Принято считать [6], что оптимальное

значение σ_3^{ont} напряжения затяжки одиночного РС, обеспечивающее соответствие его требованиям надёжности, находится между допустимыми величинами $\sigma_3^{\min}$ и $\sigma_3^{\max}$:

$$\sigma_3^{\min} < \sigma_3^{ont} < \sigma_3^{\max}. \quad (3)$$

Таким образом, на этапе изготовления ИМ, пренебрегая изменением фактического напряжения от затяжки во времени, условием качественной сборки одиночного РС, можно считать минимум отклонений фактического напряжения затяжки $\sigma_3^{факт}$ от оптимального:

$$\Delta\sigma_3 = |\sigma_3^{ont} - \sigma_3^{факт}| \rightarrow \min. \quad (4)$$

Для групповых РС, в которых количество деталей с НР больше 1, кроме выполнения условий (2) и (4), необходимо обеспечить требуемую равномерность затяжки, создающую минимум отклонений фактических значений растягивающих напряжений в стержнях между всеми болтами (шпильками):

$$\Delta\sigma_{pz} = |\sigma_i^{факт} - \sigma_k^{факт}| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $\sigma_i^{факт}$ и $\sigma_k^{факт}$ – фактические напряжения от затяжки в стержнях произвольно выбранных болтов (шпилек).

Основным источником возникновения погрешностей стадии проектирования Δ_{np} является неточность исходных данных, используемых в расчетных соотношениях, в т.ч. значений: коэффициентов трения в резьбовой части μ_p и на торце болта (под головкой) μ_m ; податливости винта (болта) λ_b и сопрягаемых деталей λ_d (или же суммарной податливости λ_Σ), которые используют при определении коэффициента основной нагрузки χ ; модуля Юнга; неточная оценка количества затяжек, выполняемых при изготовлении (ремонте, регулировке, обслуживании) ИМ, а также ряд других. Коэффициенты трения μ_p и μ_m имеют большой разброс и являются СВ, т.к. зависят от удельного давления, состояния трущихся поверхностей, вида покрытия, смазки, порядка и повторяемости сборки, скорости завинчивания, жесткости РС и т.д. [6].

Влияние податливости деталей, входящих в состав РС, λ_Σ на величину возникающей погрешности, также обусловлено комплексом факторов. Прямой аналитической зависимости между податливостью и возникающей неравномерностью затяжки не установлено, однако из экспериментов известно, что при увеличении напряжений затяжки от $\sigma_3 = 0,5\sigma_m$ до $\sigma_3 = 0,8\sigma_m$ податливость λ_Σ уменьшается на 10...40% [6]. При увеличении числа затяжек, величина разброса контролируемого

параметра (например, крутящего момента) будет уменьшаться. Обычно, после разборки РС и измерения остаточного удлинения болта, производится его замена, несмотря на отсутствие видимых повреждений.

Экспериментально установлено, что с увеличением удельного давления в резьбе, коэффициент трения μ между несмазанными резьбовыми поверхностями может как незначительно увеличиваться, так и снижаться, при этом на торце головки болта либо гайки разброс коэффициентов трения меньше, чем между резьбовыми поверхностями [2,6]. Применение смазок стабилизирует и уменьшает коэффициенты трения на 25–60%, но может инициировать релаксацию РС, из-за изменения сил трения и характера контактных взаимодействий [2,6].

Для оценки удельного веса каждого из факторов, формирующих погрешность Δ_{np} , проанализируем их взаимосвязь с позиции системного подхода. В результате декомпозиции возникает иерархический порядок [8,9], отображающий взаимосвязь первичных погрешностей элементов РС с суммарной погрешностью, возникающей на стадии проектирования Δ_{np} (таблица 1).

Таблица 1 – Результат декомпозиции погрешностей стадии проектирования

1	Коэффициент основной нагрузки, χ	Погрешности стадии проектирования
2	Отклонения твердости компонентов РС, Δ_{HB}	
3	Расчетное количество затяжек, N_z	
4	СВ коэффициент трения в резьбе, μ_P	
5	СВ коэффициент трения на торце, μ_m	
6	Разброс значений средних диаметров в РС, Δ_{d_2}	

На основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами, а также по данным [2-4,6] была выполнена количественная экспертная оценка составляющих погрешности стадии проектирования Δ_{np} . Ранжирование первичных погрешностей произведено на основе методов анализа иерархии (МАИ) и экспертных оценок [8-11]. При выборе математического аппарата и методики анализа и ранжирования погрешностей рассмотрены методы Борда, Кондорсе, Парето, Дельфи, Эрроу и ряд других [9-11]. Исходя из особенностей рассматриваемой задачи, наиболее простым и эффективным следует считать применение метода анализа иерархий (МАИ) [8-10], совместно с методом экспертных оценок [11]. Следует отметить удобство реализации МАИ в Excel. Для формализации оценки погрешностей использовалась шкала приоритетов от 1 до 9 [9,10], приведенная в таблице 2.

Таблица 2 – Шкала приоритетов для оценки погрешностей

Степень важности	Определение
1	Одинаковая значимость
3	Некоторое преобладание значимости одной погрешности перед другой (слабая значимость)
5	Существенная или сильная значимость
7	Очень сильная или очевидная значимость
9	Абсолютная значимость

В целях обеспечения компромиссов между суждениями, отличающимися от основных, используются коэффициенты 2, 4, 6, 8 [9]. В позиции для обратного сравнения пары сопоставляемых погрешностей заносятся соответствующие им обратные величины: 1/3, 1/5, 1/7 и т.д. При сравнении элемента с самим собой имеем равную значимость, поэтому на пересечении строки с соответствующим столбцом находится 1. Так, главная диагональ матрицы сравнения состоит из единиц [9].

Матрица сравнения первичных погрешностей этапа проектирования по степени их влияния, по результатам экспертных оценок, приведена в таблице 3.

Следующим шагом является вычисление главного собственного вектора с наибольшим собственным значением, который после нормализации становится вектором приоритетов по данной матрице [9,10]. Матрица сравнения возводится в степени, каждая из которых представляет собой квадрат предыдущей. Строчные суммы вычисляем и нормализуем. Вычисления прекращаются, когда разности между строчными суммами в двух последовательных вычислениях меньше заранее заданной величины. В результате расчетов получим вектор-столбец приоритетов [8–10], который для удобства представлен транспонированным в вектор-строку: [0,051;0,128;0,049;0,394;0,286;0,092].

Собственный вектор обеспечивает упорядочение приоритетов, а собственное значение этого вектора является мерой согласованности [9,10]. В общем случае, согласованностью будем считать возможность получения всех значений, необходимых для дальнейшего анализа, из основного массива необработанных данных. Отклонение от согласованности выражается величиной индекса согласованности:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (10)$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное значение; n – порядок матрицы.

Таблица 3 – Матрица сравнения первичных погрешностей этапа проектирования РС по результатам экспертных оценок

Погрешности стадии проектирования, Δ_{np}	Коэффициент основной нагрузки, χ	Отклонения твердости и компонентов РС, Δ_{HB}	Расчетное количество затяжек, N_3	СВ коэффициент трения в резьбе, μ_p	СВ коэффициент трения на торце, μ_m	Разброс значений средних диаметров в РС, Δ_{d_2}
Коэффициент основной нагрузки, χ	1	1/2	2	1/9	1/8	1/3
Отклонения твердости компонентов РС, Δ_{HB}	2	1	5	1/7	1/6	4
Расчетное количество затяжек, N_3	1/2	1/5	1	1/9	1/8	1/6
СВ коэффициент трения в резьбе, μ_p	9	7	9	1	2	4
СВ коэффициент трения на торце, μ_m	8	6	8	1/2	1	3
Разброс значений средних диаметров в РС, Δ_{d_2}	3	1/4	6	1/4	1/3	1

Для определения значения $\lambda_{\max}$ главного собственного вектора, матрицу сравнения умножаем справа на полученную оценку вектора приоритетов и полученный новый вектор. В результате деления первой компоненты этого вектора на первую компоненту вектора приоритетов, второй компоненты — на вторую компоненту вектора приоритетов и т.д., находим еще один вектор. Путем деления суммы компонент этого вектора на число компонент вычисляем искомое значение $\lambda_{\max} = 6,5545$. По (10) рассчитываем индекс согласованности ИС:

$$ИС = \frac{6,5545 - 6}{6 - 1} = 0,1109.$$

ИС сгенерированной случайным образом от 1 до 9 обратно-симметричной матрицы с соответствующими обратными величинами элементов в терминах МАИ называется показателем случайной согласованности [9]. Средние значения ПСС для матриц 6×6 и 7×7 представлены в таблице 4 [9].

Таблица 4 – Среднее значение показателя случайной согласованности (ПСС) для различных порядков матрицы

Порядок матрицы	6×6	7×7
Показатель случайной согласованности (ПСС)	1,24	1,32

Для порядка матрицы $n = 6$, ПСС=1,24 (табл.4). Далее, вычисляем отношения ИС к среднему ПСС для матрицы того же порядка, называемое отношением согласованности (ОС) [9,10]:

$$ОС = \frac{ИС}{ПСС} \text{ или } ОС = \frac{0,1109}{1,24} = 0,089. \quad (11)$$

Т.к. ОС составило менее 0,1, – согласованность суждений является приемлемой [8,9]. Полученный собственный вектор позволил установить приоритеты первичных погрешностей, то есть выполнить их ранжирование по степени влияния на суммарную погрешность при проектировании РС Δ_{np} (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты вычисления приоритетов погрешностей этапа проектирования

№	Первичная погрешность	Приоритет
1	СВ коэффициент трения в резьбе, μ_p	0,394
2	СВ коэффициент трения на торце, μ_m	0,286
3	Разброс значений средних диаметров в РС, Δ_{d_2}	0,128
4	Отклонения твердости компонентов РС, Δ_{HB}	0,092
5	Коэффициент основной нагрузки, χ	0,051
6	Расчетное количество затяжек, $П_{CB}$	0,049

После преобразований и вычислений, выполненных аналогично

приведенным выше, были определены значения приоритетов различных видов погрешностей и дефектов изготовления РД, представленные в таблица 6.

Таблица 6 – Результаты вычисления приоритетов погрешностей и дефектов стадии изготовления РД с НР и ВР

№	Погрешности и дефекты РД с НР и ВР, $\Delta_{изг}$	Приоритет
1	Отклонения среднего диаметра, Δ_{d_2}	0,285
2	Неперпендикулярность торца головки болта к оси, $\Delta \perp$	0,223
3	Погрешность формы РД с НР (интегральная оценка), $\Delta \phi$	0,201
4	Отклонения наружного диаметра, Δ_d	0,104
5	Отклонения внутреннего диаметра, Δ_{d_1}	0,049
6	Отклонения шага резьбы (на длине 25 мм), ΔP	0,042
7	Исчерпание запаса пластичности материала, Δn	0,038
8	Отклонения половины угла профиля резьбы, $\Delta \alpha$	0,033
9	Превышение допустимых напряжений в материале при накатывании НР (раскатывании внутренних резьб (ВР)), $\Delta \sigma$	0,025

По аналогичному алгоритму [9] была составлена матрица анализа погрешностей этапов жизненного цикла РС. На её основе, по методике [9,10], были определены значения приоритетов отдельных видов погрешностей, возникающих при сборке, затяжке и контроле качества РС, представленные в таблица 7.

Из проведенных расчетов видно, что наибольшее негативное влияние на качество и надежность РС оказывают погрешности изготовления РД, нестабильность рабочего цикла резьбосборочного оборудования, перераспределение напряжений в групповых РС при сборке и режимы нагружения соединений.

Таблица 7 – Результаты вычисления приоритетов погрешностей, возникающих при сборке, затяжке и контроле качества РС

№	Погрешность	Приоритет
1	Погрешности стадии изготовления РД, $\Delta_{изг}$	0,481
2	Погрешности от нестабильности рабочего цикла гайковертов, $\Delta_{г}$	0,140
3	Погрешности в групповых РС от перераспределения напряжений при сборке, $\Delta_{р}$	0,131
4	Погрешности используемых методов и средств измерения параметров затяжки, $\Delta_{изм}$	0,110
5	Погрешности от деформации деталей РС при нагружении, $\Delta_{дн}$	0,053
6	Погрешности настройки сборочного оборудования (гайковертов) на заданный контролируемый параметр, $\Delta_{нг}$	0,025
7	Погрешности стадии контроля качества РС, $\Delta_{кон}$	0,023
8	Погрешности стадии проектирования РС, $\Delta_{пр}$	0,021
9	Погрешности от превышения допустимых напряжений в деталях РС, Δ_{σ}	0,011

Выводы. Погрешности изготовления и сборки РС, в формировании которых наиболее существенно проявляется технологическая наследственность, являются одной из самых распространенных причин отказов ИМ (более 50%). Применение предлагаемой методологии позволяет экспертам делать заключения о величине снижения наработки на отказ ИМ, содержащих РС, в которые установлены детали с различными наследственными дефектами. Полученные результаты дают возможность сформировать исходные данные для полумарковских моделей [12–15], позволяющих анализировать надежность и производительность механосборочного производства с учетом технологической наследственности. Экономические оценки потерь от снижения наработки на отказ ИМ за счет дефектных РС могут быть произведены по моделям [16,17].

Направление дальнейших исследований связано с анализом стохастического характера процессов изготовления и сборки РС.

Библиографический список

1. Инженерия поверхности деталей /под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Рапацкий Ю.Л. Анализ факторов, вызывающих релаксацию и разрушение резьбовых соединений в изделиях машиностроения / Ю.Л.

- Рапацкий, В.М. Липка // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. – 2017. – №4 – 1 – (324) – С.75-80.
3. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резьбонакатывание.: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
 4. Петриков В.Г. Прогрессивные крепежные изделия / В.Г. Петриков, А.П. Власов; под ред. Петрикова В.Г. – М.: Машиностроение, 1991. – 256 с.
 5. Аверченков В.И. Основы математического моделирования технических систем / В.И. Аверченков, В.П.Федоров, М.Л. Хейфец.– М.: «Флинта», 2016. – 271 с.
 6. Биргер И.А. Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич; под ред. Биргера И.А. – М.: Машиностроение, 1990. – 365 с.
 7. Липка В.М. Рапацкий Ю.Л. 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.
 8. Ланциков А.В., Моисеев В.Б. Технология и оборудование для автоматизированной сборки резьбовых соединений.– Пенза, Пенз. гос.ун-т, 1999. –260 с.
 9. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.
 10. Saaty, Thomas L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process (англ.)// RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics): journal. – 2008. – June (vol. 102, no. 2). – P. 251–318.
 11. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике.— М.: Финансы и статистика, 2004. – 464 с.
 12. Рапацкий Ю.Л. Исследование влияния необесценивающих отказов на производительность и надежность автоматизированного механосборочного производства на основе полумарковской модели. / Ю.Л. Рапацкий, М.В. Заморенов, В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, В.М. Липка // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2019. – № 1 (5). С. 68–83.
 13. Rapatskiy Yu., Zamorenov M., Kopp V., Obzherin Yu., Gusev V., Lipka V. Research of reliability and efficiency of technological processes of mechanical assembly production on the basis of the common semi-Markov model // MATEC Web of Conferences 224, 01138 (2018), ICMTMTE 218 – P.1-8. DOI 10.1051/201822401138

14. Рапацкий Ю.Л. Влияние технологической наследственности на надежность резьбовых соединений на этапах жизненного цикла изделий машиностроения. / Ю.Л. Рапацкий, М.В. Замоленов, В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, В.М. Липка // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 6. – С. 332–353.
15. Рапацкий Ю.Л. Анализ производительности и надежности технологических процессов в машиностроении на основе полумарковской модели. /Ю.Л. Рапацкий, М.В. Замоленов, В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. – 2019. – № 1 (333). С. 22–33.
16. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем: монография. – Севастополь: СевНТУ, 2012. — 700 с.
17. Дьяков А.М. Оптимизация эксплуатационных процессов путем управления стоимостью жизненного цикла продукции / А.М. Дьяков, Д.В. Решетников // Фундаментальные исследования. – 2014. – №8(7) – С. 1528–1532.

Bibliograficheskiy spisok

1. Inzheneriya poverhnosti detaley /pod red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s.
2. Rapatskiy Yu.L. Analiz faktorov, vyzyivayuschih relaksatsiyu i razrushenie rezbovyyih soedineniy v izdeliyah mashinostroeniya / Yu.L. Rapatskiy, V.M. Lipka // Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi tehniki i tehnologii: nauchno-tehnicheskii zhurnal. – 2017. – #4 – 1 – (324) – S.75-80.
3. Kirichek A.V., Afonin A.N. Rezbonakatyivanie.: Biblioteka tehnologa. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 312 s.
4. Petrikov V.G. Progressivnyie krepezhnyie izdeliya / V.G. Petrikov, A.P. Vlasov; pod red. Petrikova V.G. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 256 s.
5. Averchenkov V.I. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tehnicheskikh sistem / V.I. Averchenkov, V.P.Fedorov, M.L. Heyfets.– M.: «Flinta», 2016. – 271 s.
6. Birger I.A. Rezbovyie i flantsevyie soedineniya / I.A. Birger, G.B. Iosilevich; pod red. Birgera I.A. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 365 s.
7. Lipka V.M. Rapatskiy Yu.L. Analiz vozdeystviya tehnologicheskoy nasledstvennosti pri izgotovlenii detaley s rezboy na nadezhnost rezbovyyih soedineniy v sudovyih mashinah i mekhanizmakh / V.M. Lipka, Yu.L. Rapatskiy // Ushakovskie chteniya: Materialyi Pyatoy Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Sevastopol, 22-23 fevralya 2018 g.). – Sevastopol: ООО «PK KIA», 2018. – S.61-69.
8. Lanschikov A.V., Moiseev V.B. Tehnologiya i oborudovanie dlya avtomatizirovannoy sborki rezbovyyih soedineniy.– Penza, Penz. gos.un-t, 1999. – 260 s.

9. Saati T.L. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarhiy. – M.: Radio i svyaz, 1989. – 316 s.
10. Saaty, Thomas L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process (angl.) // RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics): journal. – 2008. – June (vol. 102, no. 2). – P. 251–318.
11. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. Analiz, sintez, planirovanie resheniy v ekonomike.— M.: Finansyi i statistika, 2004. – 464 s.
12. Rapatskiy Yu.L. Issledovanie vliyaniya neobestsenivayuschih otkazov na proizvoditelnost i nadezhnost avtomatizirovannogo mehanosborochного производства na osnove polumarkovskoy modeli. / Yu.L. Rapatskiy, M.V. Zamorenov, V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin, V.M. Lipka // Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2019. – # 1 (5). S. 68–83.
13. Rapatskiy Yu., Zamorenov M., Kopp V., Obzherin Yu., Gusev V., Lipka V. Research of reliability and efficiency of technological processes of mechanical assembly production on the basis of the common semi-Markov model // MATEC Web of Conferences 224, 01138 (2018), ICMTMTE 218 – P.1-8. DOI 10.1051/201822401138
14. Rapatskiy Yu.L. Vliyanie tehnologicheskoy nasledstvennosti na nadezhnost rezbovyyih soedineniy na etapah zhiznennogo tsikla izdeliy mashinostroeniya. / Yu.L. Rapatskiy, M.V. Zamorenov, V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin, V.M. Lipka // Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2019.— # 6. – S. 332–353.
15. Rapatskiy Yu.L. Analiz proizvoditelnosti i nadezhnosti tehnologicheskikh protsessov v mashinostroenii na osnove polumarkovskoy modeli. /Yu.L. Rapatskiy, M.V. Zamorenov, V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin // Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi tehniki i tehnologii: nauchno-tehnicheskiy zhurnal. – 2019. – # 1 (333). S. 22–33.
16. Kopp V.Ya. Modelirovanie avtomatizirovannyih proizvodstvennyih sistem: monografiya. – Sevastopol: SevNTU, 2012.
17. Dyakov A.M. Optimizatsiya ekspluatatsionnykh protsessov putem upravleniya stoimostyu zhiznennogo tsikla produktsii / A.M. Dyakov, D.V. Reshetnikov // Fundamentalnye issledovaniya. –2014. – №8(7) – S. 1528 – 1532.

¹*Рапатский Юрий Леонидович, канд. техн. наук, доцент, директор Центра оценки качества образования, доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, u.l.rapatskiy@mail.ru*

²*Копп Вадим Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053 г. Севастополь, ул. Университетская, 33, v_kopp@mail.ru*

³*Липка Виктория Михайловна, аспирант, магистр, кафедра «Технология машиностроения» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», старший преподаватель, Филиал ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, 299001 г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 8/22, lipka.vita@yandex.ru*

INVESTIGATION OF MECHANICAL ASSEMBLY PRODUCTION WITH APPLICATION OF METHODS OF EXPERTS EVALUATION AND ANALYSIS OF HIERARCHIES

Yu.L. Rapatskiy, V.Ya. Kopp, V.M. Lypka

The mechanical assembly production is studied in order to take into account the mechanism of the influence of technological heredity on the reliability of threaded joints in engineering products at the stages of their life cycle. A methodology for the study of mechanical assembly production is proposed, which allows the use of semi-Markov models to determine the characteristics of its performance and reliability, taking into account the manifestation of technological heredity. The reliability of technological processes in mechanical assembly production, in particular, parametric failures in the manufacture of threaded parts and the assembly of threaded joints, is considered. To formalize the description of mechanical assembly production, it is proposed to apply methods of expert assessments and analysis of hierarchies. The proposed methodology allows to take into account the stochasticity of technological processes at the stages of the life cycle of engineering products

Keywords: mechanical assembly production, hierarchy analysis method, expert assessment method.

Yuriy Rapatskiy, PhD, associate professor, Director of the Center for education quality assessment, docent of Chair «Instrumentation systems and automation of technological processes», Polytechnic Institute, Sevastopol State University, e-mail: u.l.rapatskiy@mail.ru

Vadim Kopp, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of Technology of mechanical engineering, Polytechnic Institute, Sevastopol State University, e-mail: v_kopp@mail.ru

Victoria Lypka, Postgraduate student, Master, Chair of Technology of

Mechanical Engineering, Polytechnic Institute, Sevastopol State University, Senior Lecturer, Philial FGBOU VO "State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov" in the city of Sevastopol, 299001 Sevastopol, Heroes of Sevastopol str., 8/22, e-mail: lipka.vita@yandex.ru

МЕТОД СНИЖЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ РОБОТОВ

Крамаренко А.С.¹, Крамарь В.А.², Липко И.Ю.³

Аннотация. В статье рассматривается алгоритм уменьшения размерности данных, используемых для алгоритмов обучения. Областью применения данного алгоритма является антропоморфный робот. Основная идея заключается в построении для заданной траектории аппроксимирующего полинома и дальнейшее использование коэффициентов этого полинома в алгоритмах обучения. Построение полинома производится по методу построения терминальных полиномов Батенко А.П. Полученные полиномы имеют нулевые ошибки на границах траектории.

Ключевые слова. Терминальный полином, уменьшение размерности, обучающий алгоритм, антропоморфный робот.

Введение. Повсеместное использование роботов и робототехнических систем является устойчивым трендом современной промышленности. Можно утверждать, что использование многозвенных (антропоморфных) манипуляторов робототехнических систем с большим количеством степеней свободы будет расширяться. Использование подобных манипуляторов позволит значительно повысить точность выполнения манипулятивных операций, приближаясь к повторению движения руки человека.

В связи с необходимостью увеличения доли автоматизации при выполнении работ многозвенными манипуляторами в труднодоступных и опасных для человека средах, необходимо решать задачу манипулирования рабочего органа антропоморфного манипулятора. Современные роботы способны строить программу своих действий с учётом внешней обстановки. Применение интеллектуальных технологий позволяет им выполнять сложные манипуляторные операции в условиях неблагоприятной или неизвестной окружающей среды. Однако использование таких технологий приводит к необходимости хранить и обрабатывать большой массив полученной информации [1, 2].

Одним из примеров роботов с антропоморфными манипуляторами является робот SAR-400 [3], который можно использовать как прототип при разработке робототехнических комплексов (РТК) подводного и космического назначения.



Рис.1 – Копирующий костюм и робот SAR-400

Рассмотрим фрагмент набора данных полученных от копирующего костюма (**Рис.2**): правый плечевой сустав (движение в сторону). Они показывают зависимость угла поворота манипулятора РТК в относительных координатах.

На основе этих данных могут быть получены зависимости, отражающие динамику изменения управляющих параметров во времени. Как видно, траекторий, описывающих одно и тоже действие, может быть много. Каждая траектория состоит из множества точек. Эти данные, составляющие признаковое пространство алгоритмов обучения, занимают определённый объем на жёстком диске, а затем передаются в оперативную память.

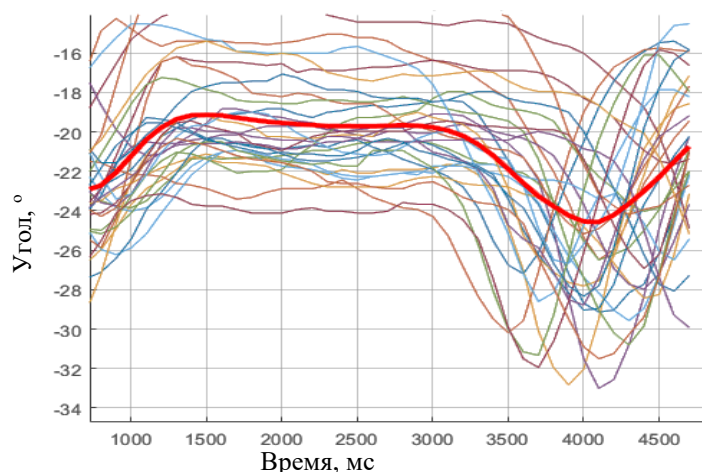


Рис.2 – Движение плечевого сустава (серия движений)

Типичной задачей для манипуляторов является захват предметов, где важна точность достижения конечных состояний. При этом точность промежуточных состояний траектории не столь важна. Этот факт является

ключевым и позволяет воспользоваться методами, применяемыми в задачах терминального управления.

Цель работы – уменьшение размерности данных, используемых для алгоритмов обучения путём замены данных натуральных экспериментов коэффициентами полинома. В основе лежит метод построения полинома, предложенный Батенко А.П. [4].

Описание задачи.

Имеется набор траекторий одного звена робота p_i , $i=1,...,N$, где N – количество траекторий, описывающих одно и то же движение. Одна траектория p_i суть матрица, столбцы которой содержат текущее состояние угла поворота звена робота и отметку момента времени

$$p_i = \begin{bmatrix} t_0 & t_1 & \dots & t_f \\ \varphi_0 & \varphi_1 & \dots & \varphi_f \\ \dot{\varphi}_0 & \dot{\varphi}_1 & \dots & \dot{\varphi}_f \\ \ddot{\varphi}_0 & \ddot{\varphi}_1 & \dots & \ddot{\varphi}_f \end{bmatrix},$$

где t_i – отметка времени, φ_i – угол поворота звена, $\dot{\varphi}_i$ – скорость угла поворота звена, $\ddot{\varphi}_i$ – ускорение угла поворота звена, f – количество засечек времени. Это обусловлено тем, что траектория движения зависит от углов поворота звеньев.

Очевидно, что угловая скорость и угловое ускорение траектории в начальный и конечный моменты времени равны нулю: $\dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_f = 0$, $\ddot{\varphi}_0 = \ddot{\varphi}_f = 0$.

Для решения указанной задачи построим терминальный полином, который будет описывать изменение угла поворота во времени. Значения терминального полинома в начальный и конечный моменты времени должны совпасть с заданными краевыми условиями $X_0 = [\varphi_0, \dot{\varphi}_0, \ddot{\varphi}_0]$ и $X_f = [\varphi_f, \dot{\varphi}_f, \ddot{\varphi}_f]$. Переход из одного состояния в другое будет достигаться за заданный интервал времени t_f . Этот путь допустим для решения поставленной задачи, т.к. ограничения накладываются только на начальном и конечном этапах, а промежуточная траектория должна быть похожа на экспериментальную, не выходя из рабочей области.

Терминальная полиномиальная траектория [4,5,6] $\varphi(t)$ описывается следующими соотношениями

$$\begin{cases} \varphi(t) = \sum_{i=0}^{n-1} c_i t^i, \\ \dot{\varphi}(t) = \sum_{i=1}^{n-1} i c_i t^{i-1}, \\ \ddot{\varphi}(t) = \sum_{i=2}^{n-1} \frac{i!}{(i-2)!} c_i t^{i-2}, \end{cases} \quad (1)$$

где коэффициенты c_i определяются исходя из граничных условий, накладываемых на начальную и конечную точку назначенной траектории движения и заданного времени перехода в терминальное состояние, n – сумма размеров векторов начальных и конечных условий.

На ряду с системой (1) составим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(t_0) = c_0 + c_1 t_0 + c_2 t_0^2 + \dots + c_n t_0^n \\ \varphi^{(1)}(t_0) = c_1 + 2c_2 t_0 + \dots + n c_n t_0^{n-1} \\ \dots \\ \varphi^{(n)}(t_0) = n! c_n \\ \varphi(t_f) = c_0 + c_1 t_f + c_2 t_f^2 + \dots + c_n t_f^n \\ \varphi^{(1)}(t_f) = c_1 + 2c_2 t_f + \dots + n c_n t_f^{n-1} \\ \dots \\ \varphi^{(n)}(t_f) = n! c_n \end{array} \right. \quad (2)$$

Коэффициенты c_i , входящие в (2), являются решением системы алгебраических уравнений, построенной на основе полиномиального представления (1) и его производных, а также на основе заданных граничных условий, определяемых векторами X_0 и X_f .

На рис. 3 показаны исходная траектория движения p_i и советуемый ей полином φ , составленный из коэффициентов c_i , полученных путём решения СЛАУ.

Для реализации этого алгоритма разработана программа. Она получает на вход три переменные (начальное значение угла y_0 конечное значение y_f и время t_f , за которое выполняется движение манипулятора РТК). Значения углов и времени берутся из экспериментальных данных p_i . В результате вычислений получаем коэффициенты полинома c_i , $i=1, \dots, n$. Более подробно, указанная задача, в сравнении с другими методами приведена в [7].

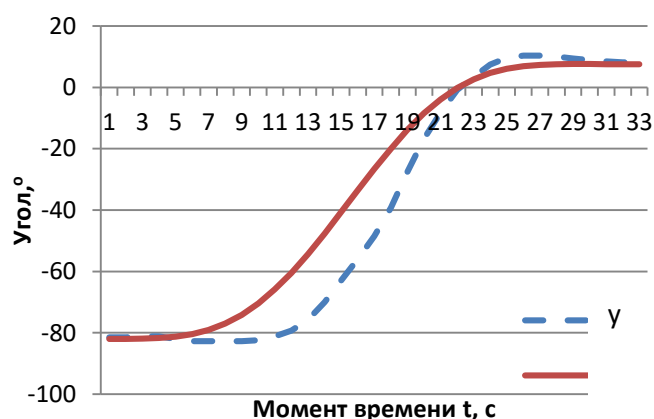


Рис.3 – Сравнение полученной траектории φ с исходной y

Заключение.

В результате решения СЛАУ соответствующей системы, получены коэффициенты полинома. Это позволяет вместо массивов данных траекторий p_i хранить коэффициенты полиномов c_i . С точки зрения объёма данных производится уменьшение в колоссальное количество раз: $4f$, где f – количество отсечек времени, против n (количество коэффициентов полинома).

Основным недостатком метода является форма траектории. Метод подходит только для случаев, когда получаемая полиномиальная траектория не сильно отличается от исходной траектории движения.

Преимуществом метода является возможность генерировать новые данные без проведения дополнительных натуральных экспериментов с использованием копирующего костюма. При этом количество узлов может быть достаточно большим.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Севастополя в рамках научного проекта № 20-41-925002.

Библиографический список

1. Нечаев Ю.И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени // Тр. 5-й Всероссийской конференции Нейроинформатика–2003. Лекции по нейроинформатике. Часть 2. – М.: МИФИ, 2003. – С. 119–179.
2. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. – М., 2013. – 387 с.
3. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // Новый оборонный заказ. Стратегии. – СПб: ООО «Дифанс-Медиа», 2019. – №5(58)
4. Батенко А. П. Системы терминального управления. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с., ил.
5. Антипин, А.С. О краевой задаче терминального управления с квадратичным критерием качества / А.С. Антипин, Е.В. Хорошилова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика, 2014. – №8. – С. 7–28.
6. Пшихопов, В.Х. Алгоритмы терминального управления подвижными объектами мультикоптерного типа / В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, Б.В. Гуренко // Мехатроника, автоматизация, управление, 2019. – №20 (1). – С. 44-51.
7. Крамарь В.А., Альчаков В.В., Крамарь О.А. Терминальный подход к построению управления антропоморфным манипулятором // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении № 4 (8), 2019. – С. 49-56

Bibliograficheskiy spisok

1. Nechaev Y.I. Mathematical modeling in onboard intelligent real-time

- systems // 5-й All-Russian Conference Neuroinformatics –2003. Lectures on neuroinformatics. 2. – М.: MIPHI, 2003. P. 119–179.
2. Vyugin V.V. Mathematical foundations of the theory of machine learning and forecasting. – М., 2013. – 387 p.
 3. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // Novii oboronniy zakaz. Strategii. – SPb: ООО «Difans media», 2019. – №5(58)
 4. Batenko A.P. Sistemy terminal'nogo upravleniya. – М.: Radio i svyaz', 1984. – 160 p.
 5. Antipin, A.S. O kraevoy zadache terminal'nogo upravleniya s kvadraticnym kriteriem kachestva / A.S. Antipin, E.V. Horoshilova // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika, 2014. – №8. – P. 7–28.
 6. 7. Pshihopov, V.H. Algoritmy terminal'nogo upravleniya podvizhnymi ob'ektami mul'tikopternogo tipa / V.H. Pshihopov, M.YU. Medvedev, B.V. Gurenko // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie, 2019. – №20 (1). – P. 44-51.
 7. Kramar V.A., Alchakov V.V., Kramar O.A. A terminal approach to the construction of control of an anthropomorphic manipulator // Automation and Measurement in Machine Instrumentation № 4 (8), 2019. - P. 49-56.

¹*Крамаренко Артём Сергеевич, учащийся, Россия, Севастополь, ГБОУ ДО Малая академия наук,*

²*Крамарь Вадим Александрович, д-р. техн. наук, профессор, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет; педагог дополнительного образования ГБОУ ДО Малая академия наук,*

³*Липко Иван Юрьевич, старший преподаватель, ivanlipko13@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет; педагог дополнительного образования ГБОУ ДО Малая академия наук*

THE DATA REDUCTION METHOD FOR MACHINE LEARNING ALGORITHMS

A.S. Kramarenko, V.A. Kramar, I.U. Lipko

The article considers an algorithm for reducing the dimensionality of data used for machine learning algorithms. This method is pleasant for anthropomorphic robot. The main idea is to construct an approximating polynomial for a given trajectory and build learning algorithms based on the coefficients of this polynomial. The construction of polynomial is based on Butenko A. P. terminal polynomials method. Usage of terminal polynomial leads to the fact that the polynomial has zero errors at the trajectory boundaries.

Key words: terminal polynomial, data reduction, machine learning, anthropomorphic robot.

Kramarenko Artem Sergeevich, pupil, Russia, Sevastopol, Minor Academy of Science,

Kramar Vadim Alexandrovich, doctor of engineer sciences, professor, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Lipko Ivan Urievich, research officer, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

НЕЧЁТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Мехтиев Т.З.

Аннотация. Для контроля и прогнозирования состояний технических систем рассматривается нечёткий подход к моделированию временных рядов показателей их параметров. Предлагается новый метод фаззификации слабо структурированных данных конкретного временного ряда, сформированного путём контрольных измерений, отражающих динамику изменения состояний технической системы за конкретный период времени. Для описания данных временного ряда по средствам нечётких множеств применяются колоколообразные функции принадлежности.

Ключевые слова. Техническая система, временной ряд, нечёткое множество, колоколообразная функция принадлежности.

Введение. Современные технические системы должны поддерживать свою работоспособность в условиях воздействия многочисленных внутренних и внешних факторов. Поэтому их функционирование в заданном режиме должно поддерживаться системами контроля и прогнозирования поведения объектов систем обеспечения, в круг задач которых входят получение информации о параметрах функционирования и её анализ на предмет идентификации текущего и прогнозирования будущего состояний посредством применения методов математической статистики. Один из этих методов связан с определением динамики изменения процессов на основе анализа и моделирования временных рядов показателей параметров технических систем. Этот метод позволяют анализировать поведение объектов, входящих в сложные системы в прошлом, настоящем и будущем, по соответственно историческим, оперативным и прогнозируемым данным.

Традиционные алгоритмы прогнозирования временных рядов, как правило, работают с данными, представленными в виде действительных чисел. Однако, во многих случаях результаты наблюдений должны рассматриваться в виде слабо структурированных величин, о которых известно только их принадлежность к определенному классу. Наиболее адекватными способами представлениями слабо структурированных данных являются интервалы вида $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$, или, что ещё лучше, высказывания вида « x близко к 7», локализирующие наблюдения относительно тех или иных структурированных величин. Поэтому, если принять к сведению, что наблюдения за поведением технической системы

через одинаковые промежутки времени осуществляются на уровне «мягких измерений», т.е. в виде термов лингвистической переменной, то формируемый временной ряд является слабо структурированным. Ясно, что по своей природе слабо структурированные временные ряды в корне отличаются от обычных числовых рядов, и поэтому для них необходим соответствующий механизм моделирования и прогнозирования. В настоящее время наиболее простым способом формализации слабо структурированных данных являются нечёткие множества (НМ) [1], которые достаточно приемлемым образом отождествляют термы лингвистических переменных через построение подходящих функций принадлежности. Поэтому слабо структурированные временные ряды целесообразно интерпретировать как нечёткие со всеми вытекающими из этого последствиями относительно их моделирования и прогнозирования.

Постановка задачи. Изменение состояния сложной технической системы рассмотрим в виде случайного процесса x_t . Тогда на основе неполной априорной информации, полученной, предположим, в результате контрольных 30-ти измерений в моменты t ($t=1\div 30$, таблица 1), динамика изменения состояний технической системы может быть интерпретирована в виде временного ряда (ВР), представленного на **Рис.1**.

Таблица 1 – Результаты измерений состояний технической системы

t	x_t	t	x_t	t	x_t	t	x_t	t	x_t	t	x_t
1	9	6	60	11	63	16	34	21	21	26	51
2	31	7	49	12	14	17	37	22	44	27	46
3	23	8	31	13	55	18	56	23	31	28	63
4	24	9	27	14	11	19	57	24	12	29	32
5	36	10	37	15	17	20	62	25	18	30	44

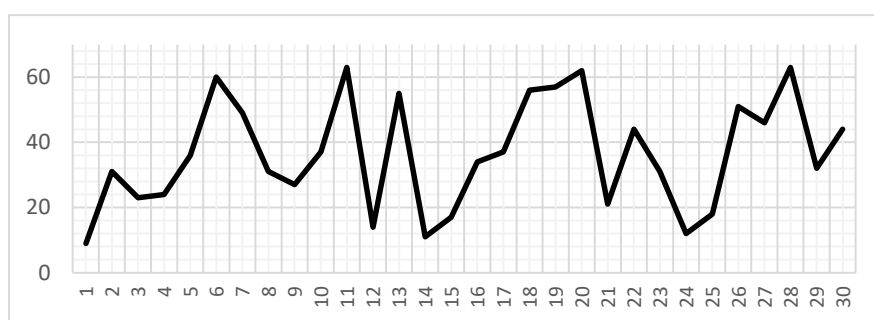


Рис.1 – ВР, отражающий динамику состояний технической системы

В силу оговоренных выше причин x_t будем считать слабо структурированной исторической данной (ИД), которую целесообразно представлять в виде подходящего нечёткого множества A_t , характеризуемого кортежем $\{x_t/\mu_{A_t}(x_t)\}$, где $\mu_{A_t}(x_t) \rightarrow [0, 1]$, $t=1\div 30$. Тогда, чтобы выявить закономерности изменения состояния технической системы,

необходимо построить нечёткую модель ВР, а значит идентифицировать подходящие функции принадлежности $\mu_{At}(x_t)$, позволяющие более адекватно описывать исторические данные в виде нечётких множеств.

Нечёткое моделирование временных рядов. Для введения нечёткости в начале необходимо определиться с универсумом. В случае ВР основанием для этого служит подходящее покрытие диапазона исторических данных. Поэтому, для построения такого покрытия воспользуемся следующей пошаговой процедурой, предложенной в [3] и использованной нами в [2].

1) *Сортировка ИД.* С целью упрощения вычислений ИД x_t ($t=1 \div n$) сортируются в возрастающую последовательность $\{x_{p(i)}\}$, где p – перестановка, которая сортирует значения ИД в порядке их возрастания, т.е. $x_{p(t)} \leq x_{p(t+1)}$.

2) *Вычисление средней величины.* Внутри набора данных $\{x_{p(i)}\}$ вычисляется средняя величина по совокупности всех попарных расстояний $d_i = |x_{p(i)} - x_{p(i+1)}|$ между любыми двумя последовательными значениями $x_{p(i)}$ и $x_{p(i+1)}$ по формуле:

$$AD(d_1, d_2, \dots, d_n) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |x_{p(i)} - x_{p(i+1)}|, \quad (1)$$

и стандартное отклонение

$$\sigma_{AD} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (d_i - AD)^2}, \quad (2)$$

3) *Выявление и устранение аномалий* резко выделяющихся величин, подлежащих выбросу. Выбросу подлежат величины попарных расстояний, которое не удовлетворяют условию: $AD - \sigma_{AD} \leq d_i \leq AD + \sigma_{AD}$.

4) *Повторное вычисление среднего расстояния* между любыми двумя последовательными значениями по совокупности величин, оставшихся после сортировки с учётом выбросов.

5) *Формирование универсума U .* После нахождения окончательного значения средней величины по совокупности всех попарных расстояний между последовательными значениями AD , универсум устанавливается в виде отрезка $U = [D_{\min} - AD, D_{\max} + AD] = [D_1, D_2]$, где $D_{\min}$ и $D_{\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения на всей совокупности ИД. При этом, согласно [3] число n нечётких подмножеств A_k универсума U , необходимых для описания ИД, устанавливается по формуле

$$n = (D_2 - D_1 - AD) / (2 \cdot AD). \quad (3)$$

Существуют разные способы для идентификации функций принадлежности, восстанавливающих нечёткие подмножества заданного

универсума. В частности, одним из таких способов является построение симметричных колоколообразных функций принадлежности вида (Рис.2)

$$\mu_{A_k}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_{k1} \\ e^{-\frac{(x-a_{k2})^2}{\sigma^2}}, & a_{k1} \leq x < a_{k2}, \\ 1, & a_{k2} \leq x \leq a_{k3}, \\ e^{-\frac{(x-a_{k3})^2}{\sigma^2}}, & a_{k3} < x \leq a_{k4}, \\ 0, & x > a_{k4} \end{cases} \quad (4)$$

с параметрами a_{ki} ($i=1 \div 4$), удовлетворяющих условиям: $a_{k2}-a_{k1}=a_{k3}-a_{k2}=a_{k4}-a_{k3}$; $\sigma=0,58$, выбранной эмпирическим путём единой для всех случаев; $k=1 \div n$, где n – общее число нечётких множеств A_k , описывающих ИД ВР, которое, согласно [3], вычисляется как

$$n = \frac{D_2 - D_1 - AD}{2 \cdot AD}. \quad (5)$$

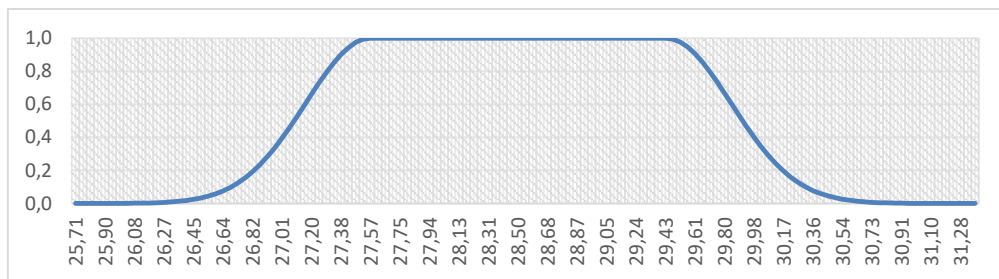


Рис.2 – Симметричная колоколообразная функция принадлежности

Руководствуясь (1) и (2), для заданного ВР (Рис.1) соответственно имеем: $AD=1,8621$ и $\sigma_{AD}=1,5023$. Отбрасывая ИД x_i , не удовлетворяющие условию $0,36 \approx 1,8621 - 1,5023 \leq x_i \leq 1,8621 + 1,5023 \approx 3,36$, устанавливается окончательное значение средней величины по совокупности всех попарных расстояний между любыми двумя последовательными значениями ИД: $AD=1,8571$. В этом случае универсумом будет отрезок

$$U=[D_2-D_1]=[9-1,8571, 63+1,8571] \approx [7,14, 64,86]$$

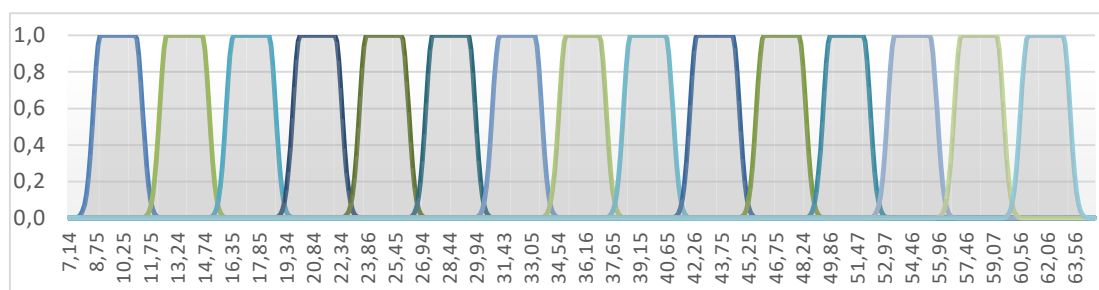
с общим числом его нечётких подмножеств для описания ИД

$$n = \frac{64,8571 - 7,429 - 1,8571}{2 \cdot 1,8571} = 15,0385 \approx 15.$$

Таким образом, для описания ИД в виде нечётких подмножеств универсума $U=[7,14, 64,86]$ идентифицированы соответствующие 15 симметричных колоколообразных функций принадлежности (Рис.3), параметры которых сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Нечёткие множества, как качественные критерии оценки ИД

НМ	Параметры колоколообразной функции принадлежности				НМ	Параметры колоколообразной функции принадлежности			
	a_{k1}	a_{k2}	a_{k3}	a_{k4}		a_{k1}	a_{k2}	a_{k3}	a_{k4}
A_1	7,14	9,00	10,86	12,71	A_9	36,86	38,71	40,57	42,43
A_2	10,86	12,71	14,57	16,43	A_{10}	40,57	42,43	44,29	46,14
A_3	14,57	16,43	18,29	20,14	A_{11}	44,29	46,14	48,00	49,86
A_4	18,29	20,14	22,00	23,86	A_{12}	48,00	49,86	51,71	53,57
A_5	22,00	23,86	25,71	27,57	A_{13}	51,71	53,57	55,43	57,29
A_6	25,71	27,57	29,43	31,29	A_{14}	55,43	57,29	59,14	61,00
A_7	29,43	31,29	33,14	35,00	A_{15}	59,14	61,00	62,86	64,71
A_8	33,14	35,00	36,86	38,71					

**Рис.3** – Функции принадлежности нечётких множеств A_k

Построенные колоколообразные функции принадлежности для качественных оценок слабо структурированных по природе ИД используем для восстановления ВР в терминах соответствующих нечётких множеств, т.е. для построения нечёткого аналога ВР по принципу – ИД ВР описывается тем нечётким множеством, к которому она принадлежит с наибольшей степенью. В тех случаях, когда ИД попадает в интервал $[a_{k2}, a_{k3}]$, найти её нечёткий аналог сравнительно легко. В остальных случаях необходимы дополнительные расчёты. В частности, для ИД 31 согласно (4) имеем: $\mu_{A_6}(31) = 0,0007$ и $\mu_{A_7}(31) = 0,7788$ (**Рис.4**). Следовательно, в качестве нечёткого аналога выбираем нечёткое множество A_7 .

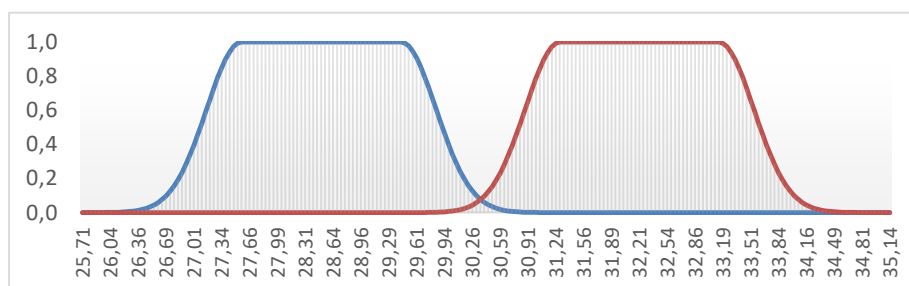
**Рис.4** – Фрагмент соседних функций принадлежности

Таблица 3 – Нечёткая модель ВР

t	x_t	НМ	t	x_t	НМ	t	x_t	НМ
1	9	A_1	11	63	A_{15}	21	21	A_4
2	31	A_7	12	14	A_2	22	44	A_{10}
3	23	A_5	13	55	A_{13}	23	31	A_7
4	24	A_5	14	11	A_1	24	12	A_2
5	36	A_8	15	17	A_3	25	18	A_3
6	60	A_{14}	16	34	A_7	26	51	A_{12}
7	49	A_{12}	17	37	A_8	27	46	A_{11}
8	31	A_7	18	56	A_{13}	28	63	A_{15}
9	27	A_6	19	57	A_{14}	29	32	A_7
10	37	A_8	20	62	A_{15}	30	44	A_{10}

Существуют разные подходы к прогнозированию нечётких ВР с учётом внутренних связей 1-го, 2-го и старших порядков. Один из таких подходов сформулирован в работах [4, 5], суть которого состоит в следующем. Если ИД x_i описана в виде НМ A_j , которое внутри совокупности ИД формирует только одну связь, скажем, отношение $A_j \Rightarrow A_k$, тогда прогнозом на следующий $(i+1)$ -ый момент будет НМ A_k . В случае, когда имеет место группа отношений, например, $A_j \Rightarrow A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{kp}$, тогда объединение $A_{k1} \cup A_{k2} \cup \dots \cup A_{kp}$ является нечётким прогнозом на $(i+1)$ -ый момент. Для дефаззификации выходов данной модели можно применить два следующих правила.

Правило 1. При наличии нечёткого отношения 1-го порядка $A_i \Rightarrow A_j$, где A_i – нечёткий аналог ИД на i -ый момент, чёткий прогноз на следующий $(i+1)$ -ый момент, как дефаззифицированное значение нечёткого прогноза A_j , рассчитывается как абсцисса середины верхней шапки соответствующей колоколообразной функции принадлежности [6]. Действительно, применяем формулу $F(A) = (1/\alpha_{\max}) \int_0^{\alpha_{\max}} M(A_\alpha) d\alpha$, где $A_\alpha = \{u | \mu_A(u) \geq \alpha, u \in U\}$ – α -уровневые множества ($\alpha \in [0, 1]$); $M(A_\alpha)$ – мощности соответствующих α -уровневых множеств, рассчитываемых по формуле $M(A_\alpha) = \sum_{k=1}^m u_k / n$, $u_k \in A_\alpha$, для НМ $A_{10} = \{0/40, 57; 1/42, 43; 1/44, 29; 0/46, 14\}$ (Табл. 2), являющимся нечётким прогнозом в связке $A_4 \Rightarrow A_{10}$,

$$0 < \alpha < 1, \Delta\alpha = 1, A_{10\alpha} = \{42, 43; 44, 29\}, M(A_{10\alpha}) = (42 + 43 + 44 + 29) / 4 \approx 43,36;$$

$$F(A_{10}) = \int_0^1 M(A_{10\alpha}) d\alpha \approx M(A_{10\alpha}) \cdot \Delta\alpha = 43,36 \cdot 1 = 43,36.$$

Правило 2. В случае нечёткого отношения вида $A_i \Rightarrow A_j$, A_t, A_p , где A_i – нечёткий аналог ИД на i -ый момент, чёткий прогноз на следующий $(i+1)$ -ый момент рассчитывается как среднеарифметическое абсцисс середин колоколообразных функций принадлежности соответствующих НМ A_j, A_t и

A_p . В частности, прогнозы на 6, 11 и 18 моменты, обусловленные внутренней связью 1-го порядка $A_8 \Rightarrow A_{13}, A_{14}, A_{15}$, рассчитывается следующим образом:

$$predict = \left(\frac{53,57 + 55,43}{2} + \frac{57,29 + 59,14}{2} + \frac{61,00 + 62,86}{2} \right) / 3 = 58,21.$$

Полученные таким образом прогнозы на основе прогностической модели 1-го порядка сведены в таблицу 4, а геометрическая интерпретация этой модели представлена на рис. 5 на фоне исходного ВР.

Таблица 4 – Модель 1-го порядка для прогнозирования ВР

t	x_t	Выход нечёткой модели	Прогноз	t	x_t	Выход нечёткой модели	Прогноз
1	9		-	16	34	A_7, A_{12}	41,50
2	31	A_3, A_7	24,79	17	37	$A_2, A_5, A_6, A_8, A_{10}$	29,24
3	23	$A_2, A_5, A_6, A_8, A_{10}$	29,24	18	56	A_{13}, A_{14}, A_{15}	58,21
4	24	A_5, A_8	30,36	19	57	A_1, A_{14}	34,07
5	36	A_5, A_8	30,36	20	62	A_{12}, A_{15}	56,36
6	60	A_{13}, A_{14}, A_{15}	58,21	21	21	A_7	32,21
7	49	A_{12}, A_{15}	56,36	22	44	A_{10}	43,36
8	31	A_7, A_{11}	39,64	23	31	A_7	32,21
9	27	$A_2, A_5, A_6, A_8, A_{10}$	29,24	24	12	$A_2, A_5, A_6, A_8, A_{10}$	29,24
10	37	A_8	35,93	25	18	A_3, A_{13}	35,93
11	63	A_{13}, A_{14}, A_{15}	58,21	26	51	A_7, A_{12}	41,50
12	14	A_7	32,21	27	46	A_7, A_{11}	39,64
13	55	A_3, A_{13}	35,93	28	63	A_{15}	61,93
14	11	A_1, A_{14}	34,07	29	32	A_7	32,21
15	17	A_3, A_7	24,79	30	44	$A_2, A_5, A_6, A_8, A_{10}$	29,24

Из-за слишком большого количества критериев оценки ИД (нечётких множеств A_k ($k=1 \div 15$)), которое подразумевает избыточный набор групп внутренних связей, совпадающего с числом прогнозируемых данных, отпадает необходимость в применении связей 2-го и старших порядков, т.к., например, нечёткая прогностическая модель 2-го порядка совпадает с установленным в таблице 3 нечётким аналогом ВР (**Рис.5**).



Рис.4 – Модели ВР 1-го и 2-го порядков

Заключение. В [6] на базе рассматриваемого ВР для ограниченного числа критериев оценки ИД нами были построены прогностические модели 1-го порядка с применением подхода С. Чена [4, 5], а также с применением нашего собственного подхода. Для оценки степени адекватности предлагаемых в [6] и в данной статье моделей временных рядов воспользуемся статистическими критериями оценки *MAPE* (Mean Absolute Percentage Error) и *MSE* (Mean Squared Error):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|predict_j - actual_j|}{actual_j} \times 100, \quad MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (predict_j - actual_j)^2.$$

Результаты прогнозов и оценки их достоверности по всем указанным моделям (**Рис.5**) представлены в таблице 5. Там же указаны соответствующие значения *MAPE* и *MSE*.

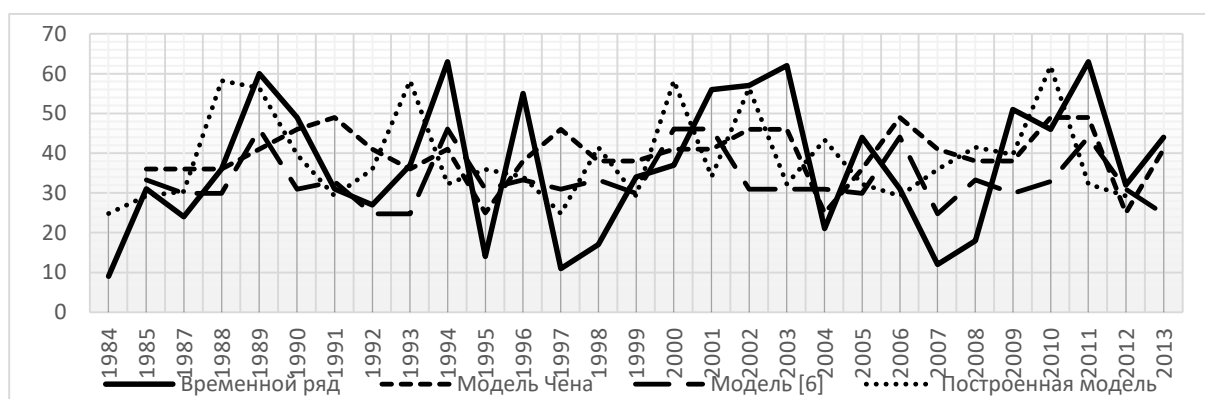


Рис. 5 – Временной ряд и его модели

Таблица 5 – Сравнительный анализ полученных результатов

t	x_t	Модель С. Чена 1-го порядка	Модель 1-го порядка, полученная в [6]	Предлагаемая модель 1-го порядка
1	9	-	-	-
2	31	36	33,2953	24,79
3	23	41	24,7750	29,24
4	24	36	29,9126	30,36
5	36	36	29,9126	30,36
6	60	41	46,0706	58,21
7	49	46	30,9644	56,36
8	31	49	32,8618	39,64
9	27	41	24,7750	29,24
10	37	36	24,7750	35,93
11	63	41	46,0706	58,21
12	14	25	30,9644	32,21
13	55	38	33,2953	35,93
14	11	46	30,9644	34,07
15	17	38	33,2953	24,79
16	34	38	29,9126	41,50
17	37	41	46,0706	29,24
18	56	41	46,0706	58,21
19	57	46	30,9644	34,07
20	62	46	30,9644	56,36
21	21	25	30,9644	32,21
22	44	36	29,9126	43,36
23	31	49	44,0833	32,21
24	12	41	24,7750	29,24
25	18	38	33,2953	35,93
26	51	38	29,9126	41,50
27	46	49	32,8618	39,64
28	63	49	44,0833	61,93
29	32	25	30,9644	32,21
30	44	41	24,7750	29,24
<i>MAPE (%)</i>		51,94	42,72	35,90
<i>MSE</i>		229,48	221,71	116,34

Как видно из результатов оценок прогнозирования по критериям *MAPE* и *MSE*, предлагаемый в статье подход существенно улучшает качество прогнозирования для выбранного ВР.

Библиографический список

1. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning / Fu K.S., Tou J.T. (eds) // Learning systems and intelligent robots. – 1974. – P. 1–10.
2. Мехтиев, Т.З. Об одном подходе к прогнозированию волатильного временного ряда / Т.З. Мехтиев // Математические машины и системы. – 2020. – № 1. – С. 82–93.
3. Ortiz-Arroyo, D., Poulsen, J.R. A Weighted Fuzzy Time Series Forecasting Model / D. Ortiz-Arroyo, J.R. Poulsen // Indian journal of science and technology. – 2018. – V. 11. – № 27. – P. 1–11.
4. Chen, S.M. Forecasting enrollments based on fuzzy time series / S.M. Chen // Fuzzy Sets and Systems. – 1996. – № 81. – P. 311–319.
5. Chen, S.M. Forecasting enrollments based on high-order fuzzy time series / S.M. Chen // Cybernetics and systems: an international journal. – 2002. – № 33. – P. 1–16.
6. Рзаев, Р.Р. и др. Моделирование временных рядов на основе нечёткого анализа позиционно-бинарных составляющих исторических данных / Р.Р. Рзаев и др. // Нечёткие системы и мягкие вычисления. – 2015. – Т. 10. – № 1. – С. 35–73.

Bibliograficheskiy spisok

1. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning / Fu K.S., Tou J.T. (eds) // Learning systems and intelligent robots. – 1974. – P. 1–10.
2. Mekhtiev, T.Z. Ob odnom podhode k prognozirovaniyu volatil'nogo vremennogo ryada / T.Z. Mekhtiev // Matematicheskie mashiny i sistemy. – 2020. – № 1. – S. 82–93.
3. Ortiz-Arroyo, D., Poulsen, J.R. A Weighted Fuzzy Time Series Forecasting Model / D. Ortiz-Arroyo, J.R. Poulsen // Indian journal of science and technology. – 2018. – V. 11. – № 27. – P. 1–11.
4. Chen, S.M. Forecasting enrollments based on fuzzy time series / S.M. Chen // Fuzzy Sets and Systems. – 1996. – № 81. – P. 311–319.
5. Chen, S.M. Forecasting enrollments based on high-order fuzzy time series / S.M. Chen // Cybernetics and systems: an international journal. – 2002. – № 33. – P. 1–16.
6. Rzaev, R.R. i dr. Modelirovanie vremennyh ryadov na osnove nechotkogo analiza pozicionno-binarnyh sostavlyayushchih istoricheskikh dannyh / R.R. Rzaev i dr. // Nechyotkie sistemy i myagkie vychisleniya. – 2015. – T. 10. – № 1. – S. 35–73.

Мехтиев Таир Закир, докторант, Tahir.mehdiyev@gmail.com, Азербайджан, Баку, Институт систем управления Национальной Академии Наук Азербайджана.

FUZZY MODELING OF TIME SERIES FOR FORECASTING THE STATE OF TECHNICAL SYSTEMS

T. Z. Mehdiyev

To control and predict the state of technical systems a fuzzy approach to modeling of indicators time series of their parameters is considered. A new method is proposed for fuzzification of weakly structured data formed by control measurements that reflect the dynamics of changes in the state of the technical system for a specified time. To describe the time series data by fuzzy sets bell-shaped membership functions are used.

Key words: technical system, time series, fuzzy set, bell-shaped membership function.

Tahir Mehdiyev Zakir, person working for doctor's degree, Tahir.mehdiyev@gmail.com, Azerbaijan, Baku, Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Science.

УДК 62-503.57

**РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАЛОЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА
КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ МЕТАЛЛ**

Денисов М.С.

***Аннотация.** Для получения достоверной информации о технологическом процессе литья с кристаллизацией под давлением разработана контрольно-измерительная система, позволяющая фиксировать основные технологические параметры процесса, к которым относятся: давление, время, перемещение. Подобраны измерительные приборы. Разработан и изготовлен датчик давления оригинальной конструкции. Выбрана аппаратная часть. Написана программа, позволяющая визуализировать получаемую информацию в виде графиков на экране ЭВМ.*

Информация с контрольно-измерительной системы может быть интегрирована в систему управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл, с целью повышения качества управления.

***Ключевые слова.** Контрольно-измерительная система, автоматизация, преобразователи, система управления, наложение давления, кристаллизующийся металл.*

Введение

Автоматизация процессов литья с наложением давления на кристаллизующийся металл позволяет повысить качество конечной продукции, увеличить производительность, снизить затраты на подготовительные и вспомогательные операции. Это становится возможным за счет использования современных контрольно-измерительных и управляющих систем, создания соответствующего технологического и информационного обеспечения систем управления.

Основная часть

Обработка кристаллизующегося металла давлением и возможность реализации идеи контроля и управления процессом формирования свойств литых заготовок осуществляется на технологическом оборудовании. В качестве данного оборудования выступает гидравлический пресс [1]. Управление работой гидросистемы пресса осуществляется в автоматизированном режиме от системы управления.

Технические характеристики пресса и основные параметры процесса приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики прессы и основные параметры процесса

№	Параметры	Обозначения	Значение
1	Температура заливки металла	°С	850
2	Начальная температура формы	°С	250
3	Давление на кристаллизующийся металл	МПа	100...500
8	Диаметр отливки	мм	90
9	Высота отливки	мм	70
10	Диаметр прессующих плунжеров	мм	30
11	Ход правого прессующего плунжера	мм	150
12	Ход левого прессующего плунжера	мм	125
13	Ход мультипликатора	мм	250
14	Усилие, прикладываемое к прессующим плунжерам	МН	0,3
15	Усилие запираания формы	МН	3
16	Ход плиты, необходимый для раскрытия формы	мм	250

Учитывая, что под влиянием давления свойства кристаллизующегося металла, в том числе его вязкость будет возрастать, предполагается, что зависимость объема расплава от температуры формы и металла, а также от величины и скорости наложения давления сложным образом связана с составом сплава, распределением температур, растворенными газами и другими факторами.

В этой связи, указанную зависимость предполагается устанавливать с учетом результатов измерений той части общего объема залитого металла, которая под давлением может быть запрессована.

Для этого необходимо с помощью компьютерной информационно-измерительной системы осуществлять запись соответствующих параметров технологического процесса. Результаты измерений должны отражать

изменение температуры металла и формы, давления в гидроцилиндрах и перемещение плунжеров.

Предлагается в качестве инструмента для обработки и визуализации информации с датчиков использовать преобразователь ADAM [2], включающий аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Внешний вид используемого преобразователя представлен на **Рис.1**.



Рис.1 – Внешний вид преобразователя ADAM

Используемые контрольно-измерительные приборы встроены в оборудование и в металлическую форму для контроля основных параметров процесса. Перечень основных преобразователей приведен ниже.

1. Датчики температуры, позволяющие фиксировать температуру отливки и температуру формы.

В качестве первичного преобразователя используются термопары типа R (платинородий-платина) с диаметром электродов 0,5 мм. Термопары установлены в стенку формы и в ее полость. Для регистрации показаний термопар используется специальная система модулей ZETlab (**Рис.2**), включающая в себя измерительные модули, преобразователь интерфейсов, а также программное обеспечение для передачи и визуализации полученных значений на мониторе ЭВМ [3,4].



Рис. 2– Система специальных модулей

Программный комплекс для регистрации данных позволяет визуализировать полученные от термопар данные в виде графиков, отображающих распределение температуры в режиме реального времени (Рис.3).

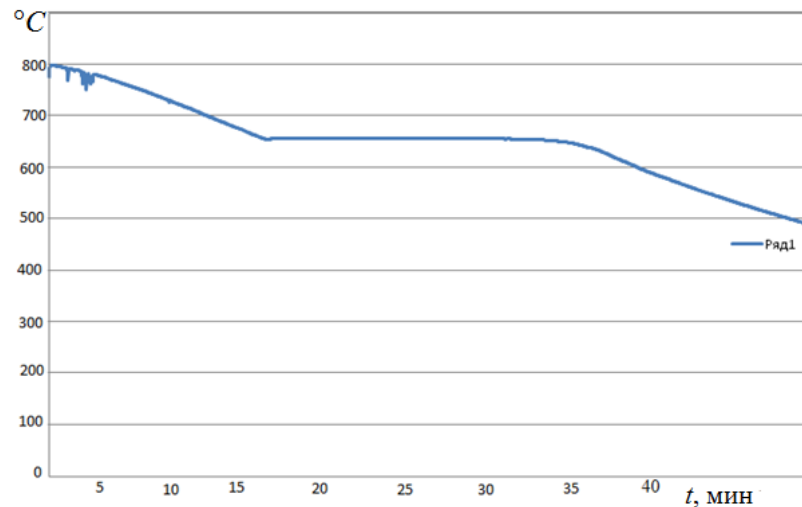


Рис.3 – График показаний термодатчика

На Рис.3 показана кривая охлаждения чистого алюминия в металлической форме. График показывает, что температура начала кристаллизации равна 660°C , что соответствует температуре начала кристаллизации из справочных материалов [5].

Выбранный программный комплекс позволяет производить точные измерения температур и может быть использован в научно-исследовательской работе.

2. Датчики давления, установленные в гидроцилиндрах и на основных магистралях гидросистемы пресса.

В качестве датчиков давления используются манометрические выключатели со встроенным цифровым индикатором (Рис.4), с двумя точками переключения и выходным сигналом 4...20 мА. Используемые датчики обладают точностью $\pm 1\%$ МЗШ, 3-х разрядным цифровым индикатором, диапазоном измерений от 0 до 200 МПа. Для оптимальной адаптации к условиям измерения в гидравлической системе пресса датчик имеет дополнительные настраиваемые параметры: время задержки при переключении, размыкающая и замыкающая функция выходов.



Рис.4 – Датчик давления рабочей жидкости в гидроцилиндре

3. Датчики перемещения, предназначенные для измерения перемещения прессующих плунжеров и подвижных узлов пресса.

Для измерения перемещения основных узлов пресса (прессующие плунжеры, плита, шток мультипликатора) используется индуктивный датчик перемещения, представляющий собой дифференциальный индуктивный преобразователь (ДИП), спроектированный и изготовленный специально для данного процесса.

В процессе разработки данного ДИП были решены следующие задачи:

- разработана схема электрическая принципиальная индуктивных датчиков перемещения с отображением расположения выводов датчиков (Рис.5);
- разработана конструкция печатной платы индуктивного датчика перемещения (Рис.6);
- отлажены и испытаны образцы индуктивных датчиков (Рис.7).

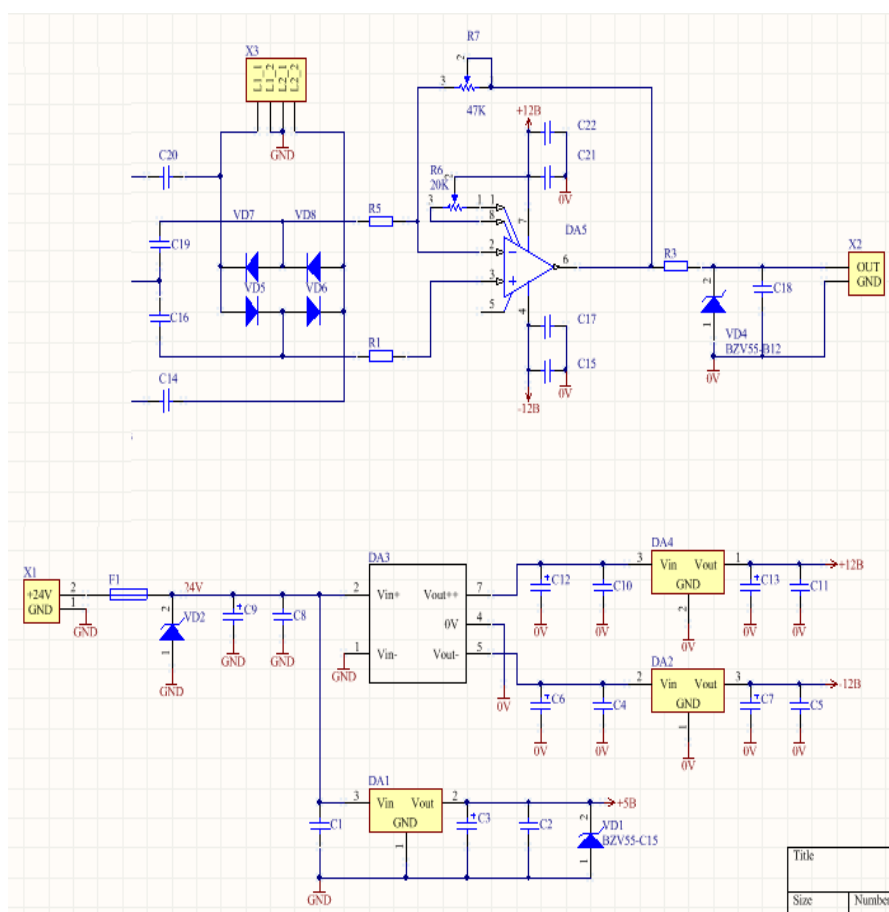


Рис.5 – Схема электрическая принципиальная

Данные для подключения датчиков измерения

- 1) Подключение к питанию +24 Вольта. Разъем X1
- 2) Подключение к входу АЦП. Разъем X2

3) Подключение индуктивностей катушки измерителя. Разъем X3



Рис.6 – Расположение элементов на печатной плате



Рис.7 – Внешний вид датчика

Для обработки и визуализации сигналов с датчиков было разработано соответствующее программное обеспечение, внешний вид которого представлен на **Рис.8**.

Вся информация с контрольно-измерительных приборов записывается и отображается на экране монитора в виде графиков. Полученная информация характеризует поведение системы во время процесса наложения давления на кристаллизующийся металл.

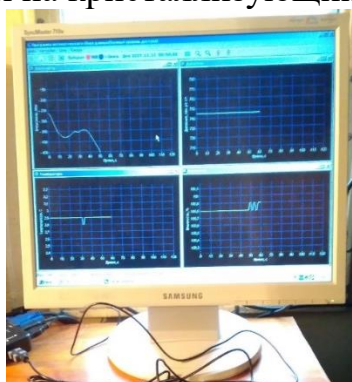


Рис.8 – Внешний вид программного обеспечения ASAD 2.0



Рис. 9 – Внешний вид шкафа

Аппаратная реализация контрольно-измерительной системы, смонтирована в шкаф (**Рис.9**).

Шкаф управления состоит из:

- программируемого 8 канального АЦП;
- промышленного источника питания, преобразующий переменное напряжение 220В в 24В;
- автоматического выключателя.

Разработанный вариант контрольно-измерительной системы обеспечивает повышение качества управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл и относится к системам реального времени. Разработанная система позволяет осуществлять контроль требуемых параметров процесса.

Заключение

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований в работе предложено решение задачи по разработке контрольно-измерительной системы, которая может быть интегрирована в систему программного управления наложением давления на жидкий и кристаллизующийся металл на базе гидравлического пресса.

Выводы

1. Разработанная контрольно-измерительная система включает блоки анализа текущего состояния работы оборудования, сравнения данных о текущем состоянии работы оборудования с заданными.
2. Информация, получаемая с контрольно-измерительной системы, может быть использована для коррекции технологических режимов работы оборудования в соответствии с требованиями оптимальности и заданных параметров обработки.

Библиографический список

1. Коростелев В.Ф. Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления. М.: Издательство "Новые технологии" 2004, 224 с.:ил.

2. SIMATIC. Programmieruemyy kontrollerr S7-200. Sistemnoe rukovodstvo [SIMATIC. Programmable controller S7-200. System management]. SIEMENS, 06/2004. 498 p. (in Russian).
3. ЗАО "Электронные технологии и метрологические системы". — <http://www.zetms.ru>.
4. ZET 210 - измерительная лаборатория на ладони. — http://www.zetms.ru/catalog/adc_dacs/adc_sigmausb.php.
5. Токов Е.Ю. Фазовые превращения соединений при высоком давлении. Справочник. Кн. 1, 2. М.: Металлургия, 1988.

Bibliograficheskiy spisok

1. Korostev V.F. Teoriya, tekhnologiya i avtomatizatsiya lit'ya s nalozheniem davleniya. M.: Izdatel'stvo "Novye tekhnologii" 2004, 224 s.:il.
2. SIMATIC. Programmieruemyy kontrollerr S7-200. Sistemnoe rukovodstvo [SIMATIC. Programmable controller S7-200. System management]. SIEMENS, 06/2004. 498 p. (in Russian).
3. ЗАО "Elektronnye tekhnologii i metrologicheskie sistemy". — <http://www.zetms.ru>.
4. ZET 210 - izmeritel'naya laboratoriya na ladoni. — http://www.zetms.ru/catalog/adc_dacs/adc_sigmausb.php.
5. Tokov E.YU. Fazovye prevrashcheniya soedinenij pri vysokom davlenii. Spravochnik. Kn. 1, 2. M.: Metallurgiya, 1988.

Денисов Максим Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры Автоматизация, мехатроника и робототехника Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ), 600000, ул. Горького 87., denisovmaxim90@mail.ru.

DEVELOPMENT OF A CONTROL AND MEASUREMENT SYSTEM FOR CONTROLLING THE PROCESS OF APPLYING PRESSURE TO A CRYSTALLIZING METAL

M.S. Denisov

To obtain reliable information about the technological process of casting with crystallization under pressure, a control and measurement system has been developed that allows you to record the main technological parameters of the process, which include: pressure, time, movement. Selected measuring devices. The pressure sensor of the original design was developed and manufactured. The hardware part is selected. A program is written that allows you to visualize the received information in the form of graphs on the computer screen. Information from the control and measurement system can be integrated into the control system for applying pressure to the crystallizing metal, in order to improve the quality of control.

Keyword: control and measurement system, automation, converters, control system, pressure application, crystallizing metal.

Maxim S. Denisov, Ph. D., associate Professor of automation, mechatronics and robotics Department of Vladimir state University named after A. G. and N. G. Stoletovs (VLSU), 87 Gorky street, 600000, denisovmaxim90@mail.ru.

УДК 581.5

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ХИРУРГИЧЕСКИМ РОБОТОМ

Кабанов А.А.¹, Крамарь В.А.², Крамарь О.А.³

***Аннотация.** Внедрение робототехнических комплексов в медицину предполагает использование автоматизированного и автоматического управления роботом при выполнении определенных этапов операций. Важным элементом построения управления подобным классом роботов является применение кинематической схемы управления. Для рассматриваемого хирургического робота разработано кинематическое управление, решающее задачи ориентации рабочего инструмента и его позиционирование. Полученные решения протестированы с помощью разработанных программ.*

***Ключевые слова.** Хирургический робот, кинематическая схема, управление.*

Введение. В настоящее время, робототехнические комплексы внедряются в различные сферы, одной из которых является медицина [1, 2]. Внедрение роботов для выполнения различных операций началось в 80-е годы 20 столетия. Применение медицинских робототехнических комплексов помогают хирургу при выполнении длительных и трудоемких операций. При этом, повышается точность выполнения различных манипуляций. Перспективной является задача построения автоматизированного и автоматического управления подобными роботами. Как и для любого другого робота, для медицинского робота при построении управления применяются методы прямой и обратной кинематики.

Будем рассматривать разрабатываемый хирургический робот-манипулятор, предназначенный для использования при проведении лапароскопических операций с использованием малоинвазивных хирургических инструментов (резектоскоп и пр.) [3, 4] (**Рис.1а**). Основными задачами, решаемыми рассматриваемым хирургическим роботом-манипулятором, являются ориентация рабочей части инструмента при условии, что пациент неподвижен и позиционирование инструмента в предположении, что тело пациента может совершать небольшие смещения.

Рассмотрим алгоритм управления для решения поставленных задач через анализ кинематической схемы хирургического робота-манипулятора.

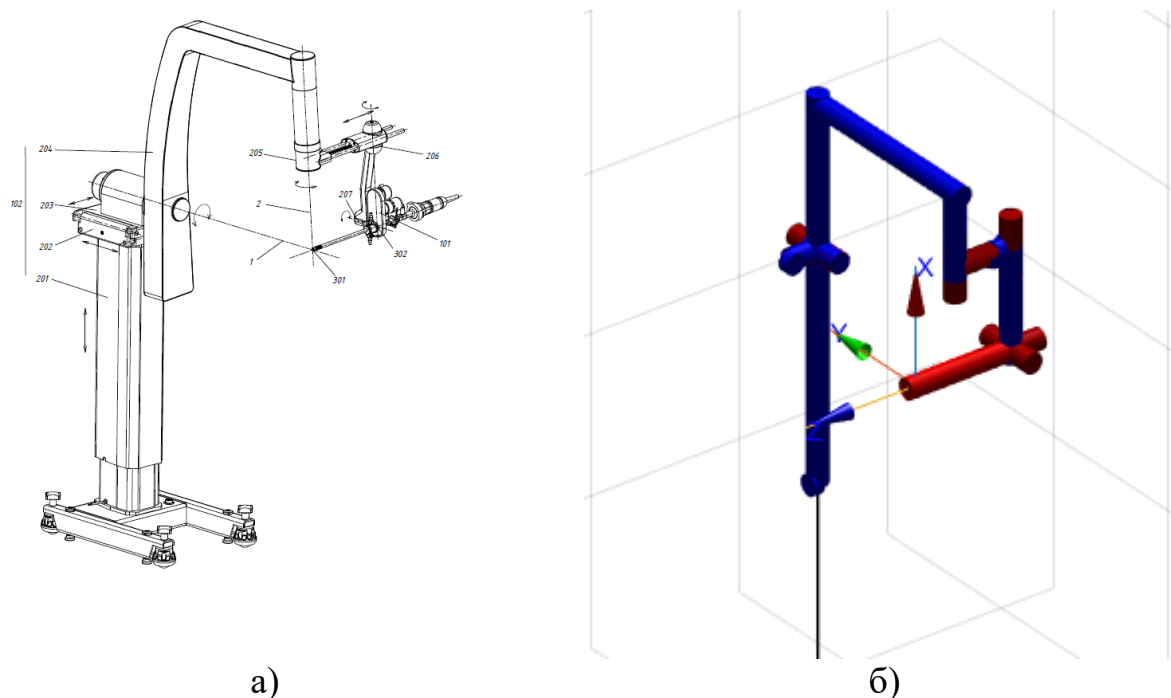


Рис.1 - а) Внешний вид конструкции робота; б) кинематическая модель робота в Matlab

Определение позиции и ориентации. Построим кинематическую модель хирургического робота-манипулятора на основе подхода Денавита-Хартенберга [5, 6]. Отличительной особенностью рассматриваемого робота является то, что его сочленения имеют как вращательные (Revolute), так и поступательные (Prismatic) движения. Некоторые сочленения робота неподвижны (Static). При этом, вращения разнонаправлены в плоскостях системы координат XYZ.

Учитывая конструктивные параметры [3], составим таблицу параметров Денавита-Хартенберга для рассматриваемой модели робота для построения ее кинематической модели (таблица 1).

Таблица 1. – Параметры Денавита-Хартенберга для модели хирургического робота-манипулятора

Тип	join	theta	d	a	alpha	offset
Prismatic	1	-1,5708	q1	0	1,5708	0,72
Prismatic	2	1,5708	q2	0	1,5708	-0,1
Prismatic	3	-1,5708	q3	0	3,14159	-0,1
Revolute	4	q4	0	0	1,5708	0
Static	5	0	0	0	1,5708	0,5
Static	6	0	0	0	1,5708	0,6
Static	7	0	0	0	0	0,3
Revolute	8	q8	0	0	1,5708	1,5708
Prismatic	9	0	q9	0	-1,5708	0,06
Revolute	10	q10	0,20	0	1,5708	-1,5708
Revolute	11	q11	0	0	1,5708	-1,5708
Revolute	12	q12	0,32	0	0	0

В таблице 1 – q_i , $i = \overline{1,4,8,12}$ – обозначение обобщенных координат узлов типа Prismatic и Revolute – углы поворота для вращательных сочленений и изменение длины для поступательных сочленений робота. Для поступательных движений, согласно таблицы 1, используются сочленения q_1, q_2, q_3, q_9 , а для вращательных – $q_4, q_8, q_{10}, q_{11}, q_{12}$.

Данная модель реализована в системе компьютерного моделирования Matlab&Simulink с использованием свободно распространяемого пакета Toolbox RTB10.4 [7]. Внешний вид полученной кинематической модели в сопоставлении с конструкцией робота представлен на **Рис.16**. Кинематическая схема хирургического робота состоит из 12 узлов.

Построенная кинематическая модель рассматриваемого робота позволяет применять решения прямой и обратной задач кинематики для его управления.

Постановка задачи кинематического управления рабочим инструментом. По условиям работы при проведении операции рабочий инструмент должен входить в тело пациента через точку, которую в дальнейшем будем называть точкой вращения. Именно через эту точку должна проходить ось вращения инструмента, не смотря на то, было ли перемещение конца рабочего инструмента (вперед – назад) или нет (**Рис.2**).

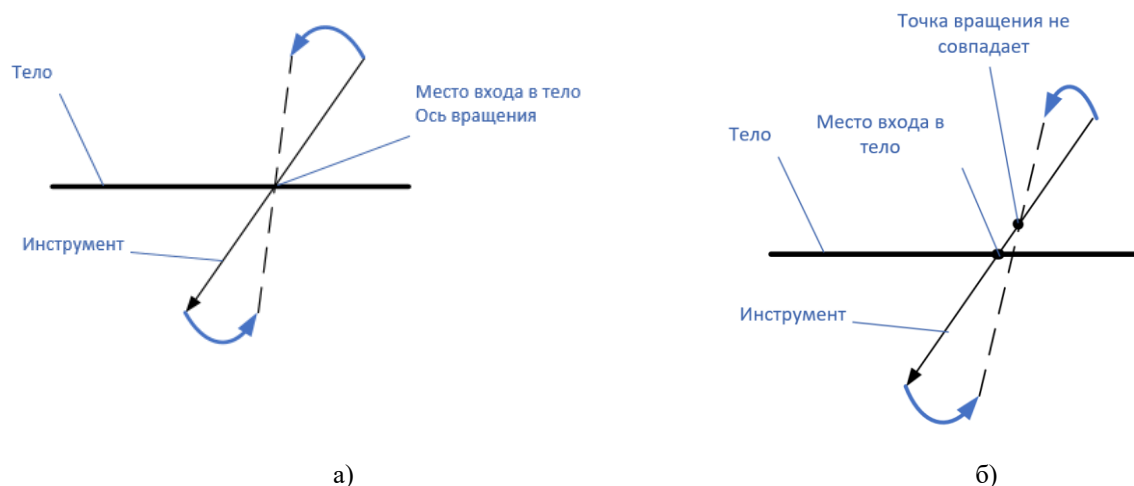


Рис.2 – Варианты расположения точки вращения инструмента; а) правильное расположение; б) смещенное положение точки

Будем считать построенную кинематическую схему избыточной, т.к. предположение о том, что все узлы работают, как указано выше (таблица 1), приводит к тому, что точка вращения уходит от места входа инструмента в тело пациента вверх вдоль оси инструмента (**Рис.2б**).

Решение поставленных задач – позиционирования и ориентации – может быть получено разбиением кинематической схемы на два параллельных контура: контур позиционирования относительно пациента (в случае незначительного изменения положения пациента относительно робота) путем изменения координаты расположения точки вращения $\Delta X = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$; контур управления ориентацией рабочего инструмента путём изменения координаты расположения точки вращения ΔX и угол поворота инструмента $\Delta \varphi$ (**Рис.3**).

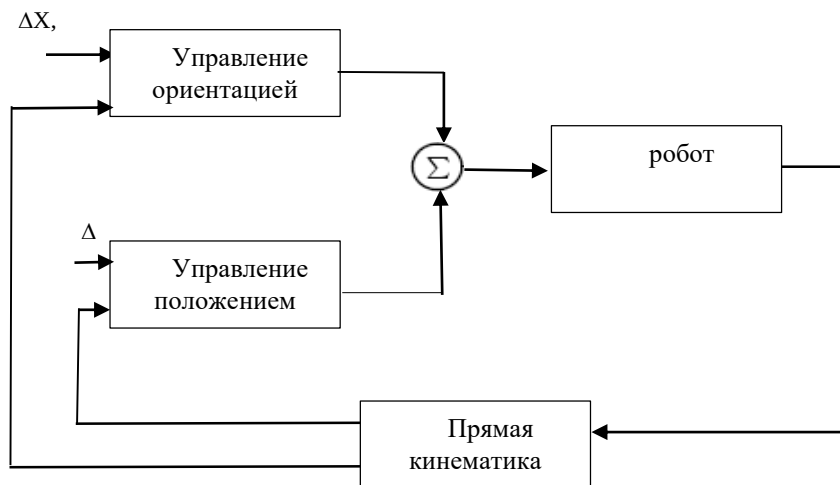
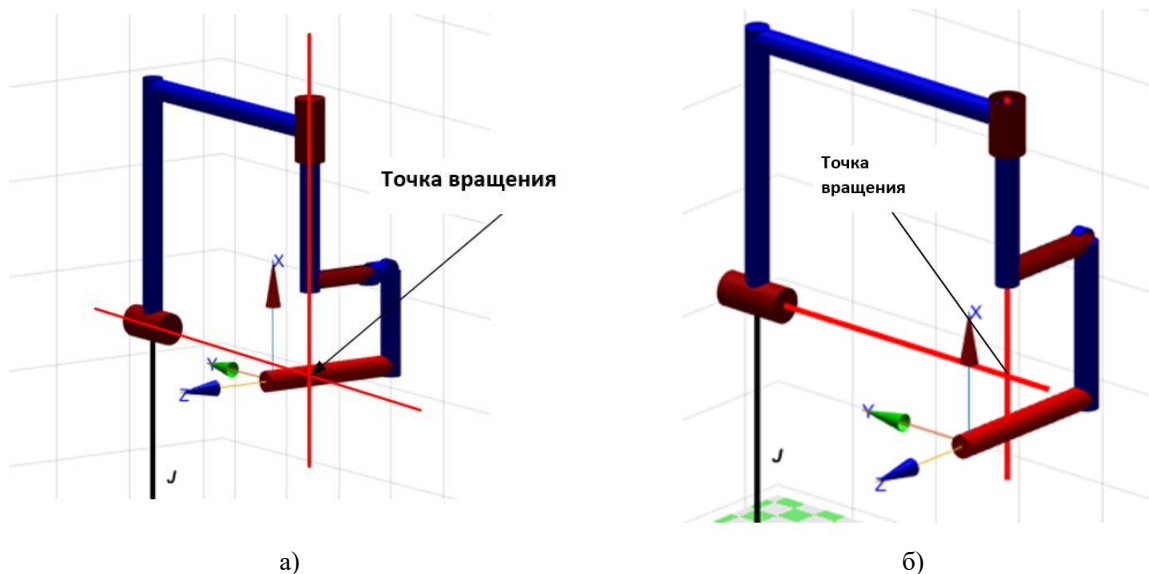


Рис.3 – Схема кинематического управления хирургическим роботом

Кинематическое управление ориентацией рабочего инструмента. Рассмотрим решение задачи обеспечения вращения инструмента только вокруг точки вращения в ходе выполнения операций. При разработке робота было принято конструктивное решение расположить управляющие двигатели 4 и 8 (таблица 1) вдоль перпендикулярных осей, имеющих точку пересечения в области точки вращения (**Рис.4**). При этом для проведения операции (выполнение манипуляций рабочим инструментом) используются только двигатели под номерами – 4, 8 и двигатель 9 для заглубления инструмента (таблица 1).



**Рис.4 – Расположение точки вращения: а) нормальное расположение;
б) ошибочное расположение**

Укажем кинематическую схему, исключив из нее узлы, незадействованные при проведении операции (таблица 2).

Таблица 2. – Параметры Денавита-Хартенберга для упрощенной модели хирургического робота-манипулятора.

Link	j	theta	d	alpha	a	offset
Revolute	4	q4	0	-1,5708	0	-1,5708
Static	5	0	q5	1,5708	0	0,5
Static	6	0	q6	1,5708	0	0,603
revolute	8	q8	0,32	1,5708	0	1,5708
Prismatic	9	0	q9	-1,5708	0	0,06
Static	10	-1,5708	q10	1,5708	0	0,2
Static	11	-1,5708	q11	1,5708	0	0
Static	12	0	q12	0	0	0,32

Для упрощения управления инструментом и вычислений при управлении роботом, расположим рабочий инструмент на пересечении осей двигателей 4 и 8 (**Рис.5**). Указанный выбор, благодаря особенности конструкции робота, позволит выполнять вращательные движения вокруг выбранной точки вращения, координаты которой являются местом входа инструмента в тело пациента. Такая конструкция позволит менять положение в пространстве рабочего инструмента без дополнительных вычислений. В результате принятого конструктивного решения, точка вращения находится на пересечении осей двигателей 4 и 8, а также, всегда находится на отрезке, проходящем вдоль рабочего инструмента (**Рис.6**). Только в таком случае мы можем обеспечить движение инструмента вовремя операции без повреждения пациента.

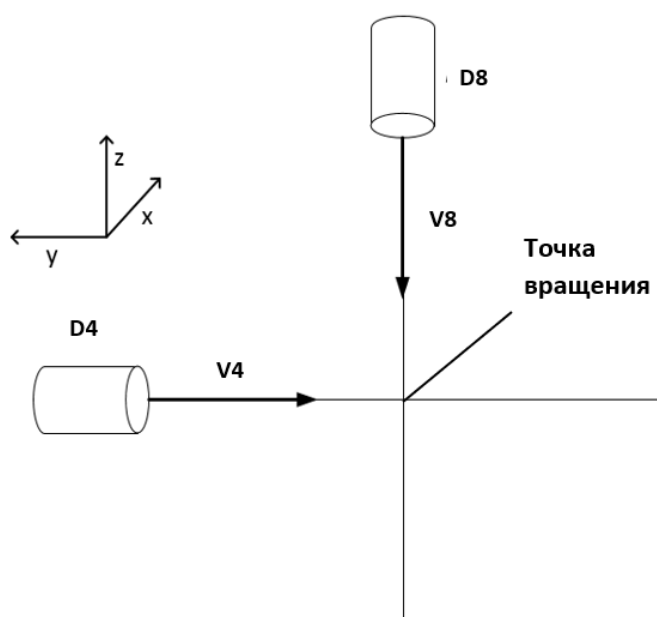


Рис.5 – Расположение рабочего инструмента

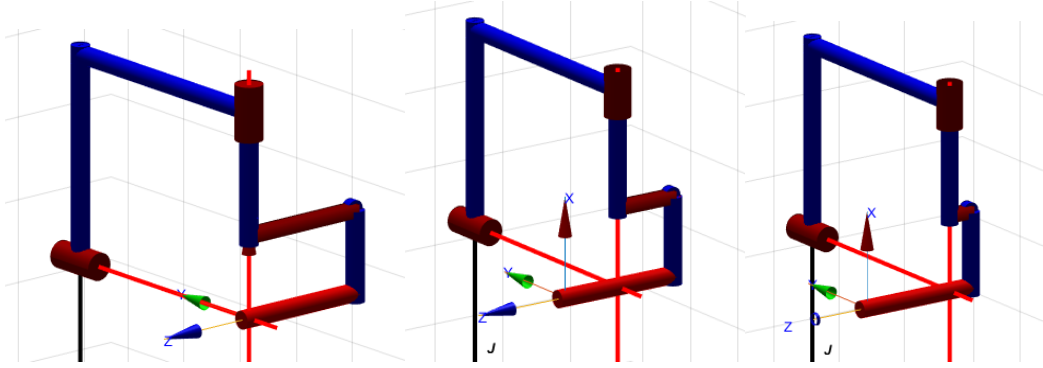


Рис.6 – Различные варианты расположения точки вращения относительно рабочего инструмента

Для указанного расположения рабочего инструмента с помощью решения прямой задачи кинематики найдем координаты точки пересечения двух прямых в пространстве. Для этого с помощью решения прямой задачи кинематики вычислим координаты расположения двигателей 4 и 8 в базовой системе координат, связанной с первым сочленением (основанием робота) по полной кинематической модели робота из раздела 1 и значениям обобщенных координат ($q_1, q_2 \dots q_n$), где q_i – обобщенные координаты, n – число степеней свободы робота, предполагая, что хирургический робот находится в исходном положении (см. таблицу 1).

В результате вычислений получим, что двигатель 4 имеет координаты $[0\text{м } 0\text{м } 0.72\text{м}]$, а двигатель 8 имеет координаты $[0\text{м } -0.6\text{м } 0.92\text{м}]$ относительно базовой системы координат.

Зная ось вращения двигателей, определим координаты векторов (**Рис.5**)

$V_4 = [0\text{м } 0\text{м } 0.72\text{м}; 0\text{м } -1\text{м } 0.72\text{м}]$, $V_8 = [0\text{м } -0.6\text{м } 0.92\text{м}; 0\text{м } -0.6\text{м } 0\text{м}]$.

Используем метод, приведенный в [8] для нахождения координат точки пересечения двух прямых вдоль векторов V_4 и V_8 .

Пусть заданы прямые L_1 и L_2 в параметрическом виде:

$$L_1 : \begin{cases} x = x_1 + m_1 t, \\ y = y_1 + p_1 t, \\ z = z_1 + l_1 t. \end{cases} \quad L_2 : \begin{cases} x = x_2 + m_2 t, \\ y = y_2 + p_2 t, \\ z = z_2 + l_2 t. \end{cases} \quad (1)$$

где $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$ – точки, лежащие на прямых L_1 и L_2 , соответственно, а $q_1 = \{m_1, p_1, l_1\}$ и $q_2 = \{m_2, p_2, l_2\}$ – направляющие векторы прямых L_1 и L_2 , соответственно.

Точка пересечения прямых L_1 и L_2 находится в результате решения уравнений

$$x_1 + m_1 t = x_2 + m_2 t, \quad y_1 + p_1 t = y_2 + p_2 t, \quad z_1 + l_1 t = z_2 + l_2 t,$$

и подстановки полученных значений t в уравнение (1).

Таким образом, зная координаты точки вращения, можно контролировать ориентацию рабочего инструмента с помощью указанных выше двигателей, сохраняя точку вращения на оси рабочего инструмента.

Кинематическое управление положением рабочего инструмента.

Рассмотрим задачу позиционирования рабочего инструмента относительно пациента при проведении непосредственно операции (в случае незначительного изменения положения пациента относительно робота). Для решения этой задачи необходимо использовать при реализации управления 3 двигателя. Как указывалось ранее, для проведения операции (выполнение манипуляций рабочим инструментом) использованы двигатели под номерами – 4, 8 и 9 (таблица 1). Для корректировки положения робота относительно пациента используются двигатели под номерами – 1, 2, 3.

На **Рис.4б** приведена реализация модели, при которой произошло отклонение рабочего инструмента от точки вращения. При таком положении робота производить операцию нельзя. Поэтому при каждом движении инструмента необходимо проверять его положение относительно точки вращения.

Выберем способ проверки нахождения точки на отрезке, используя прямую задачу кинематики, позволяющую определить координаты точек рабочего инструмента. С этой целью, измерены два расстояния:

- от точки вращения до начала инструмента (a);
- от точки вращения до конца инструмента (b).

Сумма длин a и b должна равняться длине инструмента (**Рис.7**), т.е. должно выполняться условие $a+b-c=0$.

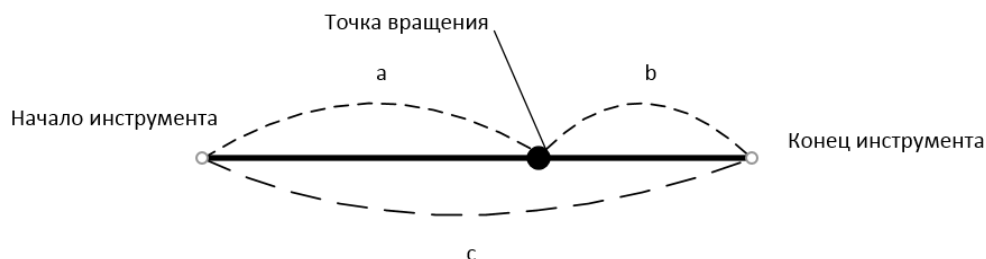


Рис.7 – соотношение длин при правильном расположении точки вращения.

На **Рис.8** приведена ситуация отклонения точки вращения от оси инструмента, при котором выполняется условие $a+b>c$.

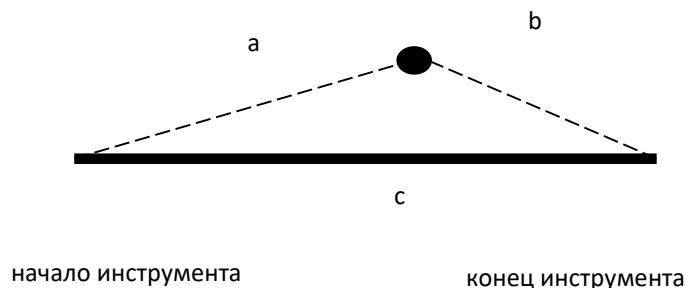


Рис.8 – Соотношение длин при неправильном расположении точки вращения

Таким образом, получаем, что если сумма длин a и b больше длины инструмента, то точка вращения вышла за пределы оси рабочего инструмента. Для реализации управления, после каждого движения необходимо решать прямую задачу кинематики для определения координат начала и конца рабочего инструмента.

При правильной организации подсистемы кинематического управления ориентацией рабочего инструмента, при вращательном движении конец инструмента должен двигаться по сфере, центром которой является точка вращения. На **Рис.9** приведен пример вращения инструмента робота с проекцией на одну плоскость.

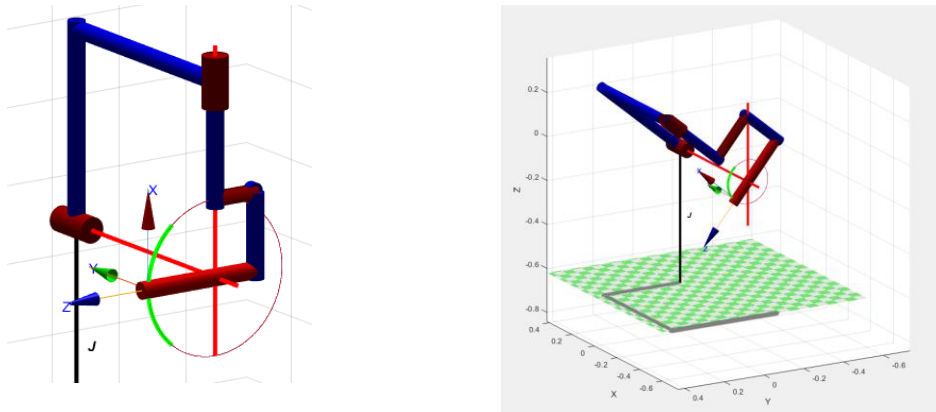
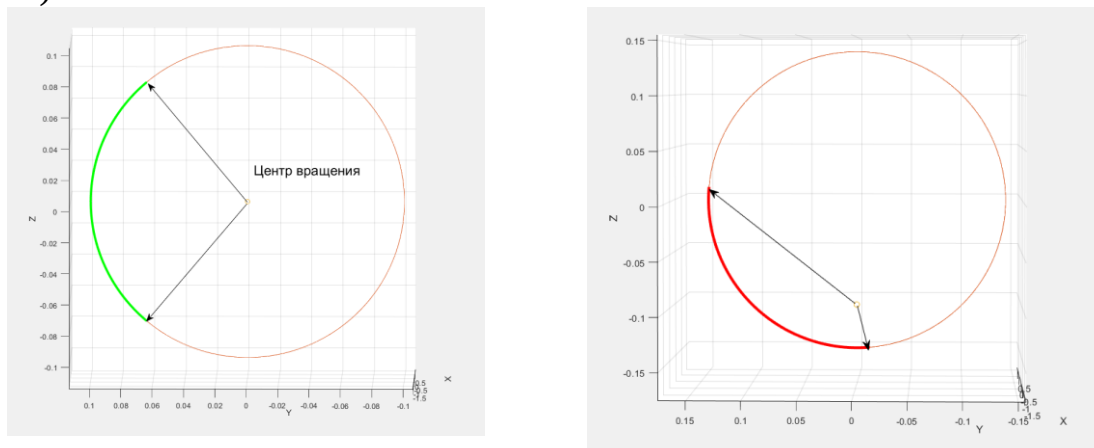


Рис.9 – Вращение рабочего инструмента

Если произошло смещение рабочего инструмента от точки вращения, то центр его вращения не будет совпадать с координатами точки вращения робота (**Рис.10**).



а)

б)

Рис.10 – а) нормальное положение инструмента; б) отклонение рабочего инструмента от точки вращения

Если обнаружено, что инструмент сместился относительно точки, то необходимо компенсировать это отклонение и сместить конструкцию робота так, чтобы оси двигателей 4 и 8 снова находились на отрезке, проходящем вдоль рабочего инструмента, но сам инструмент должен оставаться неподвижным.

Рассмотрим указанную ситуацию (**Рис.11**).

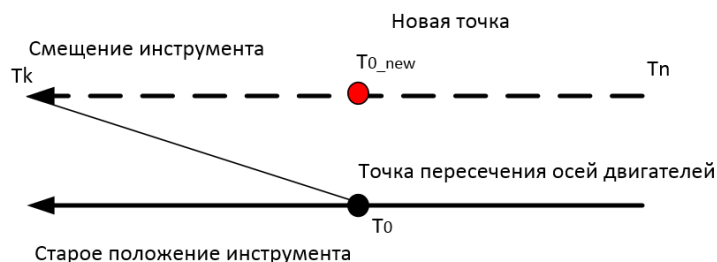


Рис.11 – Смещение инструмента относительно точки вращения

Для приведения робота в рабочее положение необходимо найти координаты точки T_{o_new} . Для решения этой задачи строится вектор $\overline{T_k T_0}$. Вычислив проекцию вектора $\overline{T_k T_0}$ на вектор $\overline{T_k T_n}$ – вектор $\hat{T_k T_0}$, можем найти координаты искомой точки T_{o_new} .

Используя неравенство Шварца, получим, что искомая проекция вектора равна

$$\hat{T_k T_0} = \alpha \overline{T_k T_n}, \quad \alpha = \frac{(\overline{T_k T_0}, \overline{T_k T_n})}{(\overline{T_k T_n}, \overline{T_k T_n})}.$$

Если в результате вычислений обнаружено, что произошло смещение инструмента относительно изначальной точки вращения, необходимо произвести коррекцию. Как указывалось выше, в кинематической схеме коррекцией во всех координатных плоскостях управляют двигатели 1, 2 и 3. Для того что бы узнать на какую величину производить коррекцию, достаточно вычислить изменение расстояния между новой точкой пересечения осей двигателей 4, 8 (точка T_{o_new}) и предыдущей точкой T_0 по всем трем координатам x, y, z .

В завершение рассмотрения управления позиционированием рабочего инструмента приведем график перемещения рабочего инструмента в зависимости от времени. По оси ординат отложим значение угла вращения рабочего инструмента вокруг оси Y. Красной линией отмечено положение точки вращения. При этом, если максимальное значение амплитуды на графике всегда одно и тоже, значит инструмент вращается вокруг необходимой точки. Если произошло отклонение точки пересечения осей двигателей, линия вращения будет отклоняться (зеленый маркер) (**Рис.12**).

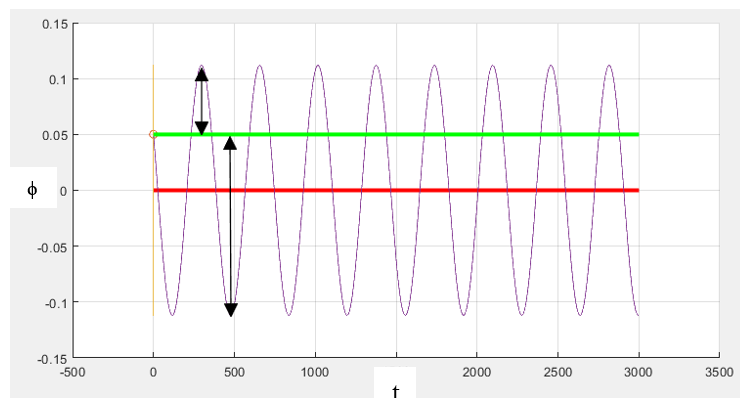


Рис.12 – Изменение угла вращения рабочего инструмента вокруг оси Y

В результате, мы должны сместить конструкцию робота с помощью двигателей 1, 2, 3, таким образом, чтобы зеленая линия характеризовала точку вращения рабочего инструмента (**Рис.13**).

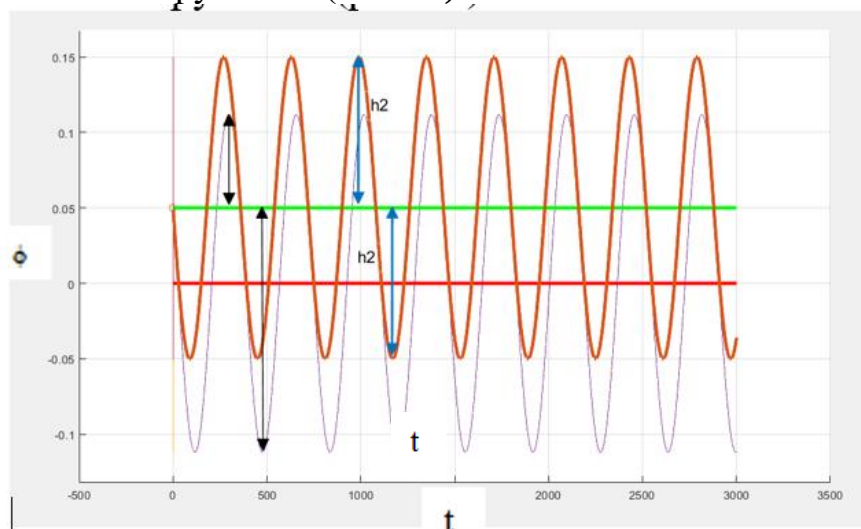


Рис.13 – Корректировка расположения рабочего инструмента

Таким образом, при визуальном контроле (по выводимым графикам), отклонения рабочего инструмента в результате перемещения пациента необходимо, чтобы оператор, управляющий роботом, не допускал отклонения зеленой линии от красной.

Вывод. В статье рассмотрены варианты построения кинематического управления хирургическим роботом, разработанного в НОЦ «Мехатроника и робототехника» Севастопольского государственного университета. Предлагаемая система кинематического управления основана на решении двух задач – задачи управления ориентацией рабочего инструмента и задачи его позиционирования. Полученные схемы управления ориентацией и положением независимы друг от друга и основаны на применении конструктивных решений и упрощения избыточной кинематической схемы робота, построенной на основе подхода Денавита-Хартенберга. Предлагаемый подход является базисом для

построения алгоритмов автоматизированного и автоматического управления рабочим инструментом хирургического робота на отдельных этапах операций.

Работа выполнена в рамках реализации внутреннего гранта Севастопольского государственного университета 2020г., (номер проекта № 37/06-31).

Библиографический список

1. Шевченко Ю.Л., Карпов О.Э., Ветшев П.С., Степанюк И.В. Робототехника в хирургии - истоки, реалии, перспективы // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. 2008. №2.
2. Mohammad H Abedin-Nasab Handbook of robotic and image-guided surgery Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2020, 752 p.
3. Кабанов А.А., Машин С.П., Токарев Д.А. Роботизированный комплекс для выполнения хирургических операций // Сборник трудов конференции VIII Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии материалы». Омск, 2018.
4. Токарев Д.А., Путин А.Н., Ениватов В. В. Моделирование робототехнического комплекса в виртуальной среде разработки // Транспортное дело России. 2019. №6. С. 174-177.
5. 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
6. J.Denavit, R.S.Hartenberg, (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 23, 1955.-215–221
7. Peter Corke Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in Matlab// Springer International Publishing AG 2017, 697p.
8. Gilbert Strang Introduction to Linear Algebra, Wellesley - Cambridge Press, 2016, 574 p.

Bibliograficheskiy spisok

1. Shevchenko U.L., Karpov O.E., Vetshev P.S., Stepanuk I.V. Robotics in surgery - the origins, realities, prospects // Bulletin of the National Medical and Surgical Center. N.I. Pirogov. 2008. №2.
2. Mohammad H Abedin-Nasab Handbook of robotic and image-guided surgery Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2020, 752 p.
3. Kabanov A.A., Mashin S.P., Tokarev D.A. Robotic complex for surgical operations // Proceedings of the Conference of the VIII International Scientific and Technical Internet Conference of Young Scientists "Automation, Mechatronics, Information Technology Materials." Omsk, 2018.
4. Tokarev D.A., Putin A.N., Enivatov V.V. Modeling of a robotic complex in a virtual development environment // Transport business of Russia. 2019. №6. S. 174-177.

5. 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
6. J.Denavit, R.S.Hartenberg, (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 23, 1955.-215–221
7. Peter Corke Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in Matlab// Springer International Publishing AG 2017, 697p.
8. Gilbert Strang Introduction to Linear Algebra, Wellesley - Cambridge Press, 2016, 574 p.

¹*Кабанов Алексей Александрович, канд. техн. наук, доцент, kabanov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

²*Крамарь Вадим Александрович, д-р техн. наук, проф., kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

³*Крамарь Олег Александрович, kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

KINEMATIC CONTROL SCHEME OF SURGICAL ROBOTS

A.A. Kabanov, V. A. Kramar, O. A. Kramar

The introduction of robotic systems in medicine involves the use of automated and automatic robot control when performing certain stages of operations. An important element in constructing control for such a class of robots is the use a kinematic control scheme. For the surgical robot a kinematic control has been developed that solves the tasks of orienting the working tool and its positioning. The resulting solutions are tested using developed programs.

Key words: surgical robot, kinematic diagram, control.

Kabanov Aleksey Aleksandrovich, PhD, associate professor

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

Kramar Oleg Aleksandrovich, kramarv@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №2(10) 2020 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

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

Адрес редакции:

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

Телефон редакции: 8(692)550077

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

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

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

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

Учредитель и издатель

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

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

Главный редактор: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 13.07.2020. Заказ 010К. Дата выхода в свет: 22.07.2020. Тираж: 50 экз.
Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 12,43.

Севастополь, 2020