

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№1(21)
2023

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

Выходит 4 раза в год

ISSN 2658-4727

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО- ПРИБОРОСТРОЕНИИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Севастополь, 2023

Главный редактор

Копп В.Я., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Заместитель главного редактора

Филипович О.В., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Научный редактор

Бохонский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Ответственный секретарь

Балакин А.И., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Варганов М.В., д.т.н., проф.

(г. Москва)

Греков Н.А., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Доронина Ю.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Жмудь В.А., д.т.н., проф.,

(г. Новосибирск)

Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Моисеев Д.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Пашков Е.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Песчанский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Петрешин Д.И., д.т.н., проф.

(г. Брянск)

Прейс В.В., д.т.н., проф.

(г. Тула)

Щенятский А.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Заморёнов М.В., к.т.н., доц

(г. Севастополь)

Майстришин М.М., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Рапацкий Ю.Л., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

- Карлов А.Г., Бочаров И.В.** Обоснование и моделирование параметров точности позиционирования трехкоординатного манипулятора автоматизированного комплекса установки резбовых заклёпок при сборке шкафов серии «Эталон» **3**
- Бохонский А.И., Головин В.И., Рыжков А.И.** Изгибно-крутильные колебания нежесткой заготовки при автоматизированной токарной обработке **19**
- Чаленков Н.И., Невар Г.В.** Моделирование манипулятора типа SCARA в Matlab/Simulink при использовании библиотек Simscape **27**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Варминская Н.И.** Стабилизация жесткости руки упругого манипулятора при изменении ее геометрических параметров **33**
- Балакин И.А., Балакина Н.А.** Имитационная модель гибкой автоматизированной линии с повторным обслуживанием по результатам контроля **43**
- Мурашковский И.А., Вожжов А.А.** Исследование влияния настройки элементов пневмоподвески на колебания составных элементов транспортного средства **55**
- Филипович О.В., Филипович В.О.** Решение задачи селективной сборки двух элементов с мультипликативной моделью «вход-выход» с использованием аппроксимации **61**
- Заморёнов М.В., Мирзоян Н.Ю., Заморёнов И.М.** Имитационная модель в AnyLogic структуры «накопитель – технологическая ячейка – накопитель» **70**

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Балакина Н.А., Балакин И.А.** Исследование влияния точности изготовления измерительной руки на погрешность координатных измерений **78**

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 658.512.2(075.8)

ОБОСНОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ТРЕХКООРДИНАТНОГО МАНИПУЛЯТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ РЕЗЬБОВЫХ ЗАКЛЁПОК ПРИ СБОРКЕ ШКАФОВ СЕРИИ «ЭТАЛОН»

Карлов А.Г.¹, Бочаров И.В.²

Аннотация. Представлен анализ особенностей автоматизации технологических процессов установки резьбовых заклепок в деталь-заготовку, являющейся основанием комплектно распределительного устройства серии «Эталон». Приведены результаты исследования и моделирования электромеханического привода при двухскоростном управлении с обратной связью по скорости. Проведен анализ механических характеристик резьбовых заклепок, обоснованы параметры автоматизированного процесса сборки таких заклёпок. Результаты расчётов и моделирования позволили оценить границы роста производительности автоматизированного комплекса сборки по сравнению с базовым проектом.

Ключевые слова. Автоматизация сборочных операций; резьбовая заклепка; электромеханическая система; пневматический заклёпочник; точность позиционирования; резьбовая (гаечная) заклепка.

Проекты автоматизации и роботизации процессов сборки различных объектов во многих отраслях промышленности всегда вызывали значительные затруднения у конструкторов ввиду многообразия конструкций сборочных единиц, комплектующих, особенностей процессов совмещения базовых поверхностей собираемых изделий. Процессы ручной сборки изделий при наличии средств механизации и ручных специализированных инструментов не вызывают особых затруднений у конструкторов и технологов. Однако, если есть потребность значительного увеличения партий собираемых вручную изделий, то ручной труд и дефицит рабочих невысокой квалификации может стать препятствием роста производительности сборочных операций.

Известно, что для перевода процессов сборки с ручного на автоматизированный требуется проработка объектов сборки по критерию пригодности их к автоматизации. Так же требуется обоснование, моделирование, проектирование оптимальных по многим критериям автоматизированных и роботизированных технологических комплексов. Такие проблемы имеются на многих предприятиях различных отраслей промышленности [1].

В данной работе предлагаем ознакомиться с особенностью объектов сборки на электротехническом заводе «Таврида Электрик». К настоящему времени это предприятие серийно произвело более 2000 комплектно распределительных устройств (КРУ) «Эталон».

В связи с увеличением спроса на рынке на эти изделия поставлена задача модернизации текущего производства, планируется увеличить выпуск шкафов КРУ «Эталон» до 4000 штук в год. Так же планируется увеличение номенклатуры шкафов.

Производство не удовлетворяет технической политике компании, все этапы по подготовке сборочных единиц выполняются вручную. На сборку одного рассматриваемого в данной работе изделия рабочий затрачивает 375 секунд (на комплектацию 105 секунд и на сборку 270 секунд).

Поставлена задача разработки автоматизированного комплекса, позволяющего в автоматическом режиме подготавливать сборочные единицы к установке в комплектно распределительные устройства. Основным результатом проектирования автоматизированного комплекса сборки шкафов серии «Эталон», будет являться законченная технология, которая обеспечит необходимую маршрутную технологию при использовании современного оборудования, которое гарантированно обеспечить расчетные параметры, необходимые для успешного применения выбранного технологического оборудования.

Целью настоящего исследования является анализ особенностей структуры, компоновочных решений автоматизированного комплекса установки резьбовых заклёпок при сборке шкафов серии «Эталон», сформированного на базе трехкоординатного манипулятора с обоснованием и моделированием динамических характеристик приводов и достижимых при этом параметров точности позиционирования. Кроме того, исследования должны были дать обоснованные границы роста производительности технологических процессов сборки шкафов серии «Эталон» по отношению к базовому варианту проекта реализации технологических процессов позиционирования, сборки и фиксации нескольких десятков резьбовых заклёпок для различных модификаций шкафов серии «Эталон».

Проектируемый автоматизированный комплекс сборки шкафов серии «Эталон» включает в себя манипулятор, работающий в декартовой системе координат с тремя программируемыми осями на базе мехатронной системы для позиционирования инструмента пневматического резьбового заклепочника, который обеспечивает сопряжение и фиксацию резьбовых (гаечных) заклепок. Заклепочник является рабочим органом автоматизированной системы для сборки. Это позволяет непрерывно позиционировать, совмещать с отверстиями в сопрягаемой детали-заготовке (раме-основании шкафа серии «Эталон») и фиксировать резьбовые (гаечные) заклепки посредством этого рабочего органа - пневматического резьбового заклепочника.

Компоновка такого комплекса представлена на **Рис.1**. В этот комплекс входят: 1 – конвейер; 2 – заготовка; 3 – пневмоцилиндры для базирования заготовки на конвейере; 4 – пневматический заклепочник; 5 – основание манипулятора из стандартного профиля; 6 – датчик наличия заготовки; 7 – трехкоординатный манипулятор.

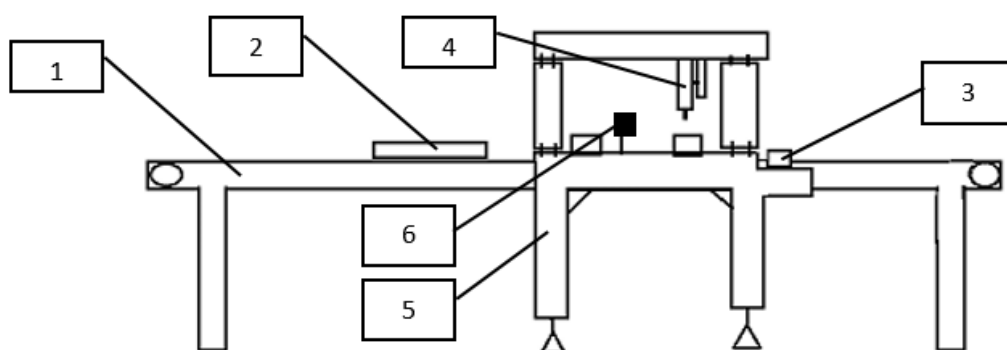


Рис.1 – Компоновка комплекса автоматизированной клепки изделий

Резьбовая заклёпка гайка - это крепёжное изделие, которое позволяет создать надежное резьбовое соединение в тонком листовом материале. Также резьбовые заклёпки используются для соединения (склёпывания) нескольких листовых материалов с последующим использованием полученного резьбового соединения для крепления прочих элементов конструкции посредством болтов или винтов.

Резьбовые заклёпки гайки особенно хорошо подходят для применения в местах с ограниченным доступом, например, там, где нет доступа к обратной стороне рабочей поверхности.

Для корректной установки резьбовых заклепок используют специальный инструмент, который называется резьбовой заклепочник

[2,4]. В данном проекте будет использован пневматический резьбовой заклепочник фирмы WURTH PEG 312 (**Рис.2**). Технические характеристики пневматического заклепочника WURTH PEG 312 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики WURTH PEG 312

Рабочее давление	7 бар
Длина хода	7 мм.
Длина	260 мм.
Ширина	85 мм.
Высота	280 мм.



Рис.2 – Пневматический резьбовой заклепочник WURTH PEG 312

Технологический процесс установки резьбовой заклепки.

Заклепка помещается в заранее подготовленное отверстие в базовом материале (диаметр отверстия зависит от размера заклепки и определяется по каталогу производителя). Резьбовой шток заклепочника ввинчивается в гаечную заклепку (**Рис.3**).

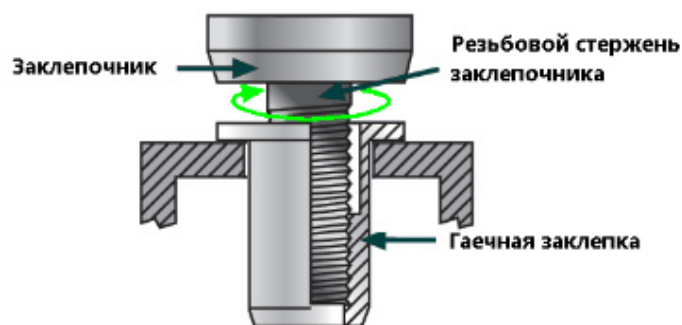


Рис.3 – Заклепочник вкручивается в заклёпку

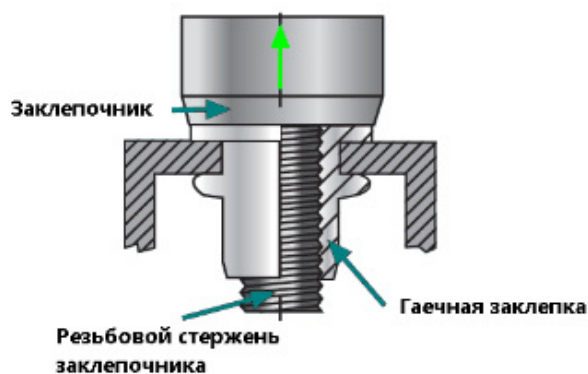


Рис.4 – Деформация заклепки

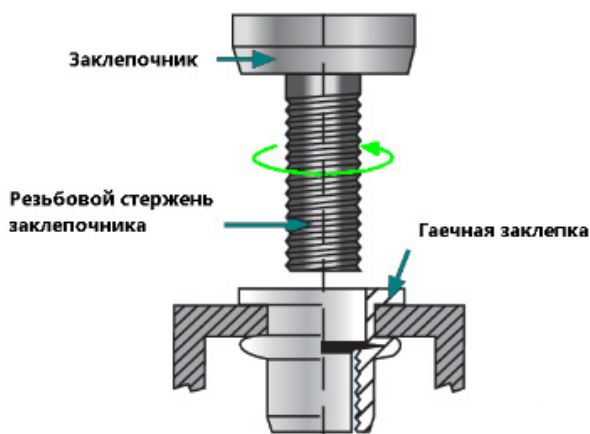


Рис.5 – Извлечение заклепочника из заклепки

Далее резьбовой стержень втягивается в корпус заклепочника и часть заклепки не имеющая внутренней резьбы деформируется надежно фиксируя заклепку в отверстии (длина заклепки подбирается по каталогу

производителя в зависимости от толщины материала в который ее нужно установить) (**Рис.4**).

После установки резьбовой стержень заклепочника выкручивается из заклепки, на этом процесс установки завершен (**Рис.5**).

Моделирование и исследование следящей электромеханической системы (ЭМС) управления приводами переменного тока с двухскоростным управлением.

При двухскоростном управлении электромеханическим приводом координат манипулятора основной отрезок пути (70-80%) проходится на максимальной скорости, а в конце перемещения производится переход на низкую (ползучую) скорость и на этой скорости осуществляется позиционирование. Этот способ обеспечивает достаточно высокую точность позиционирования и обеспечивает ограничение по ускорению. Наиболее широко применяется в подъёмных механизмах (краны, лифты), а также в металлорежущих станках для сокращения времени холостых ходов.

Трёхкоординатная электромеханическая система состоит из трех модулей перемещения (**Рис.6**): модуль координаты X – Линейный модуль перемещения со шпинделем EHMХ-ELGC-80-BS-KF; модуль координаты Y - Линейный модуль перемещения со шпинделем EНMY-RP-ELGC-80-BS-KF; модуль координаты Z - Пневматический линейный модуль DНMZ-DGST-16, с установленным пневматическим заклепочником WURTH PEG 312 [5,6].

Перед началом процесса моделирования ЭМС, необходимо произвести проверочный расчёт действующих нагрузок в системах портального типа. Кинематическая схема МС портального типа представлена на **Рис.7**.

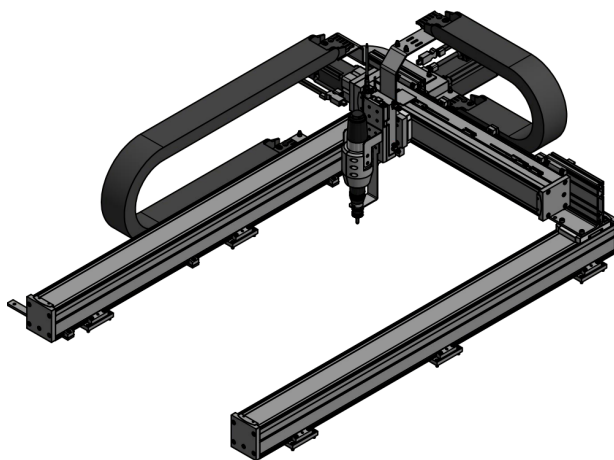


Рис.7 – Трёхкоординатная электромеханическая система манипулятора

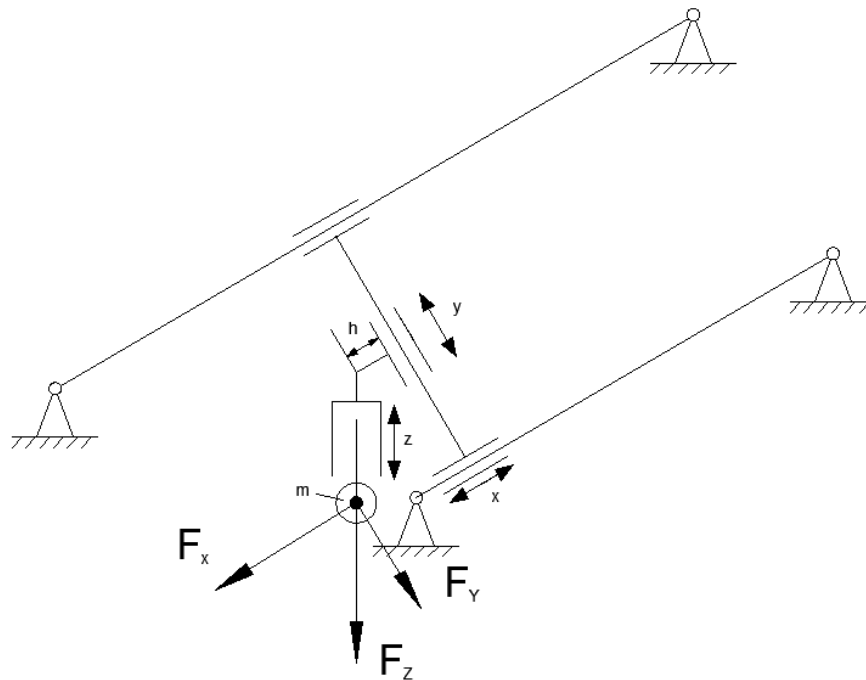


Рис.8 – Кинематическая схема манипуляционной системы порталного типа

Расчёт производится последовательно по координатам X, Y, Z. Усилие привода координаты Z $F_{прz}$ может быть определено из выражения:

$$F_{привода} \geq F_Z + (m + m_z)(g + a_{\max}) + F_{тр},$$

где m - масса исполнительного органа ИО, с креплением = 2 кг; m_z – масса модуля Z = 0.9 кг; g – ускорение свободного падения; максимальное ускорение $a_{\max} \approx 0,5 \dots 0,6 g = a_{\max} \approx 0,5 \cdot 9,8 = 4,9 \text{ м}^2/\text{с}$;

$$F_{тр} = f \cdot N = 0,25 \cdot (m + m_z)(g + a_{\max}) = 0,25 \cdot (2 + 0,9)(9,8 + 4,9) = 10,6 \text{ Н},$$

где f – коэффициент трения, $f = 0,2 \dots 0,25$; N – сила нормального давления; m – масса перемещаемого объекта.

$$F = (2 + 0,9)(9,8 + 4,9) + 10,6 = 53,2 \text{ Н}$$

Расчет привода координаты Y

$$F_{привода}^x \geq F_x + M \cdot a_{\max} + F_{трения}$$

$$M = m_z + m_{ио} + m_{кл} = 2 + 0,9 + 1 = 3,9 \text{ кг}$$

$$F_{трения} = f \cdot G, \quad G = g \cdot (m_z + m)$$

где m_z - масса всего привода Z

$$G = 9,8 \cdot (0,9 + 2 + 1) = 38,2$$

$$F_{привода}^x \geq 3,9 \cdot 4,9 + 9,55 \geq 28,66 \text{ Н}$$

M – сумма подвижного элемента привода, а также масса всего привода координаты Z и масса груза m :

$$F_{привода}^Y \geq F_Y$$

$$F_{привода}^Z \geq F_Z + G$$

$$F_{привода}^Z \geq 0 + 38,2 \geq 38,2 \text{ Н}$$

$$M_x = l \cdot g(m_Z + m); l - \text{плечо}$$

$$M_x = 0,105 \cdot 9,8(2 + 0,9) = 2,98 \text{ Нм}$$

Определение момента инерции привода координаты Y

$$J = J_d + J_p + mr^2 = J_d + 4,24 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-4} = 0,00072 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где J_d – момент инерции вращающихся частей двигателя (см. таблицу 5); m – масса переносимая приводом Y ; r – радиус шпинделя электродвигателя.

$$m = m_{ио} + m_z + m_{кл} + m_{п.у} = 2 + 1 + 0,9 + 0,8 = 4,7 \text{ кг},$$

где $m_{ио}$ – масса исполнительного органа (заклепочника); m_z – масса привода координаты Z ; $m_{кл}$ – масса пневматического клапана заклепочного инструмента; $m_{п.у.}$ – масса подвижных частей привода Y .

Аналогично производится расчет привода координаты X

Моделирование АЭП с двухскоростным управлением для привода координаты Y

Структурная схема разомкнутой ЭМС переменного тока представлена на **Рис.9**.

Моделирование разомкнутой ЭМС переменного тока с двухскоростным управлением осуществляется по известному алгоритму [3].

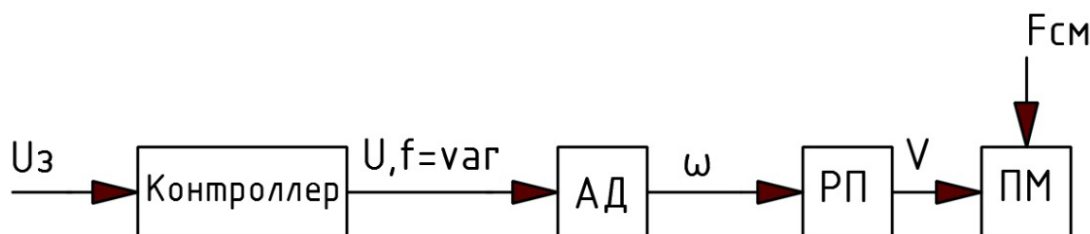


Рис.9 – Структурная схема электромеханической системы переменного тока с обратной связью по скорости

где U_z – задающее напряжение; АД – асинхронный двигатель; ω – частота вращения вала двигателя; РП – ременная передача; V – скорость перемещения каретки модуля; ПМ – производственный механизм.

Для проведения дальнейших расчетов необходимо выписать основные параметры двигателя координаты Y – Серводвигатель EMMB-AS-60-04-S30SB.

Динамика ЭМС переменного тока описывается аналогично системам постоянного тока уравнением $J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$,

где J и M_c – приведенные значения момента инерции и момента сопротивления; M – активный момент асинхронного двигателя.

Для интегрирования уравнения движения запишем его в виде:

$$d\omega = \frac{M - M_c}{J} dt.$$

Программа по указанному алгоритму написана в среде MathCAD 15.

Для нахождения оптимальных значений параметров F_1 и X (где F_1 – частота при которой привод проходит основной участок пути, а X – расстояние до точки $Y_{зад}$ на котором привод переходит на частоту F_2) построим графики функций $t_n = f(F_1)$ и $t_n = f(X)$ соответственно.

Для построения первого графика $t_n = f(F_1)$ необходимо составить таблицу экспериментальных данных 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные параметра t_n при изменении частоты F_1 ($F_2=20$ Гц; $X=0.05$ м; $Y_z=320$ мм.)

№	F_1 , Гц	t_n , сек	δ , м
1	30	0,83	$5,51 \times 10^{-5}$
2	50	0,59	$1,306 \times 10^{-5}$
3	70	0,53	0,031
4	80	0,57	0,079
5	90	0,62	0,128

График зависимости времени перемещения от частоты $t_n = f(F_1)$ представлен на **Рис.10**. Из графика $t_n = f(F_1)$ (**Рис.10**) следует что минимальное значение t_n при $F_1=70$ Гц, но по совокупности двух параметров (t_n и δ) принимаем значение $F_{1\text{ опт.}} = 50$ Гц.

Для построения графика функции $t_n = f(X)$ необходимо составить таблицу экспериментальных данных 3.

Таблица 3 – Экспериментальные данные параметра t_n при изменении параметра X ($F_2=20\text{Гц}$; $Y_z=320\text{мм}$; $F_1=50\text{Гц}$.)

№	X , м	t_n , сек	V_1 , м/с	V_2 , м/с	δ , м
1	0,01	0,64	0,75	0,4	0,052
2	0,02	0,6	0,75	0,35	0,027
3	0,04	0,58	0,75	0,3	$1,387 \times 10^{-4}$
4	0,05	0,59	0,75	0,3	$1,306 \times 10^{-5}$
5	0,06	0,64	0,75	0,3	$1,306 \times 10^{-5}$
6	0,08	0,66	0,75	0,3	$1,306 \times 10^{-5}$

График зависимости времени перемещения от задаваемой величины X , представлен на **Рис.11**.

Из графика $t_n = f(X)$ (**Рис.11**) следует что минимальное значение t_n при $X=0,04$ м, но по совокупности двух параметров (t_n и δ) принимаем значение $X_{\text{опт.}} = 50$ Гц.

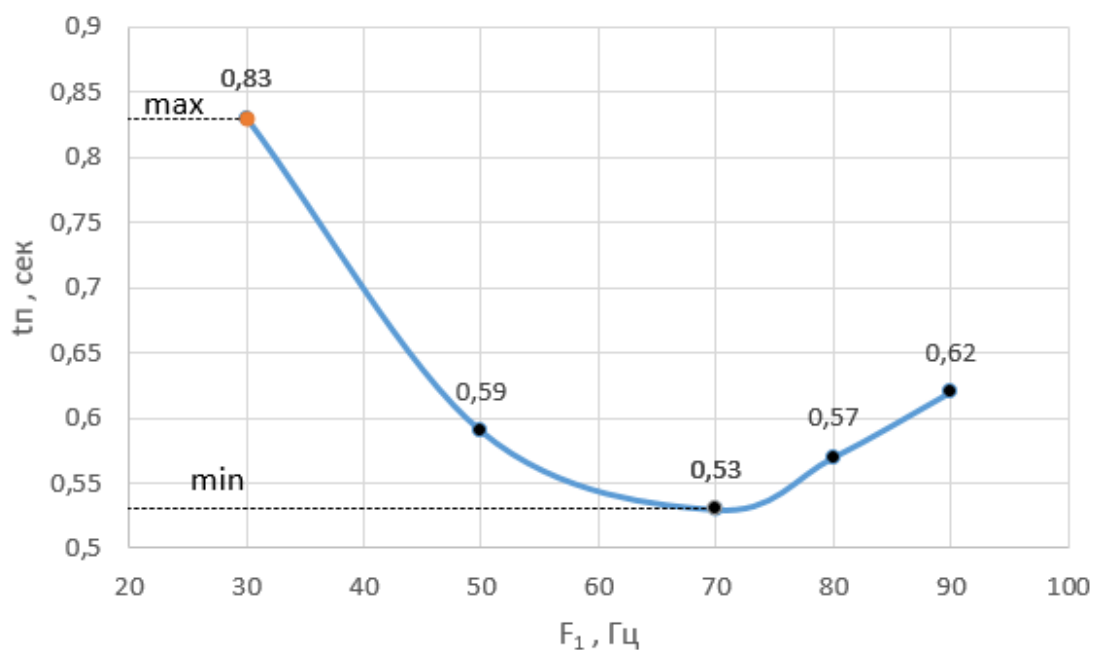


Рис.10 – График функции $t_n = f(F_1)$

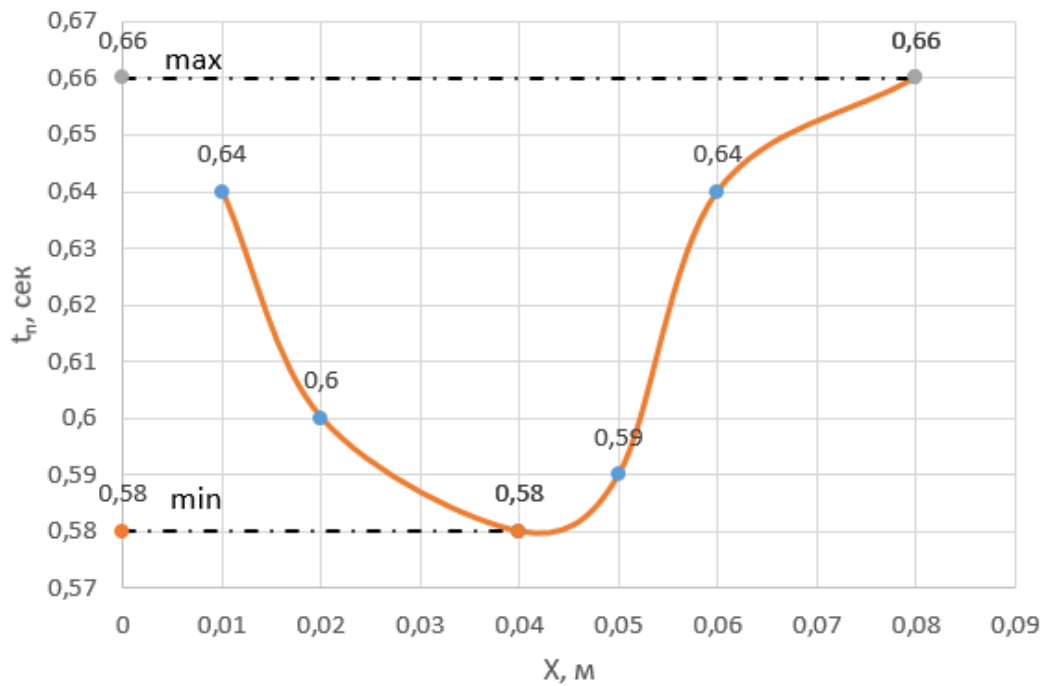


Рис.11 – График функции $t_n = f(X)$

Графики динамических характеристик, построенные с учетом принятых параметров $F_{l \text{ опт.}}$ и $X_{\text{опт.}}$, представлены на **Рис.12-15**.

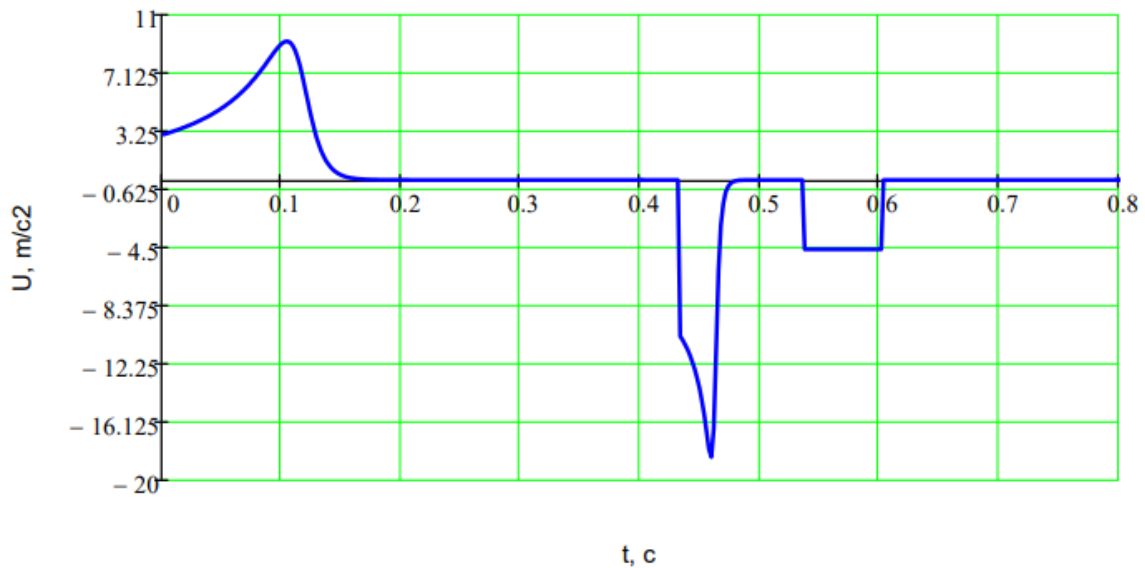


Рис.12 – График зависимости частоты вращения от времени

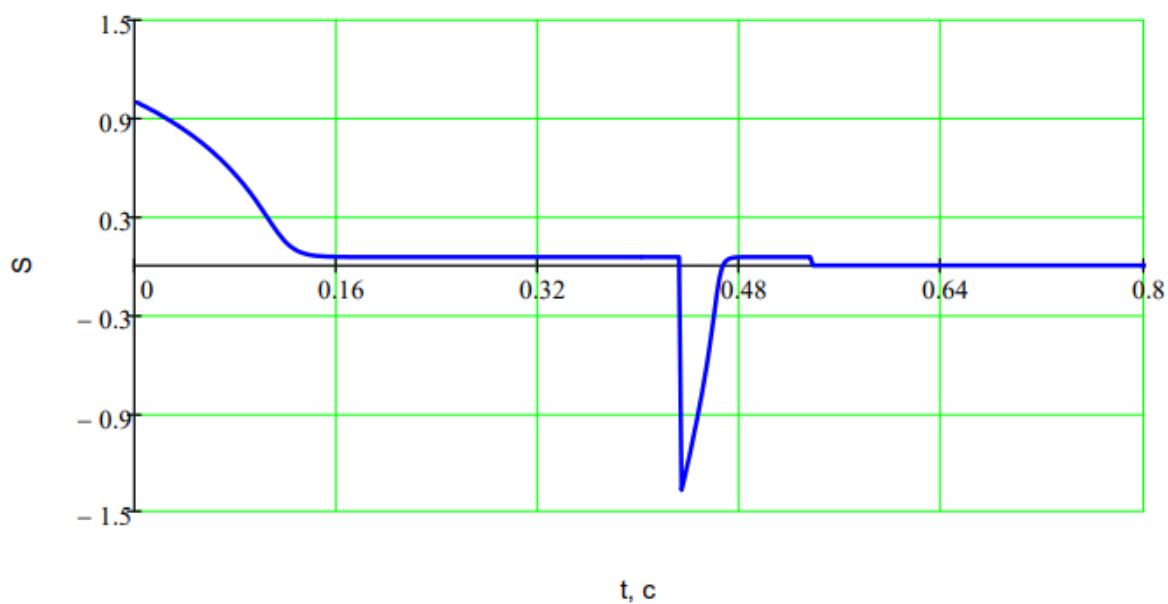


Рис.13 – График зависимости скольжения от времени

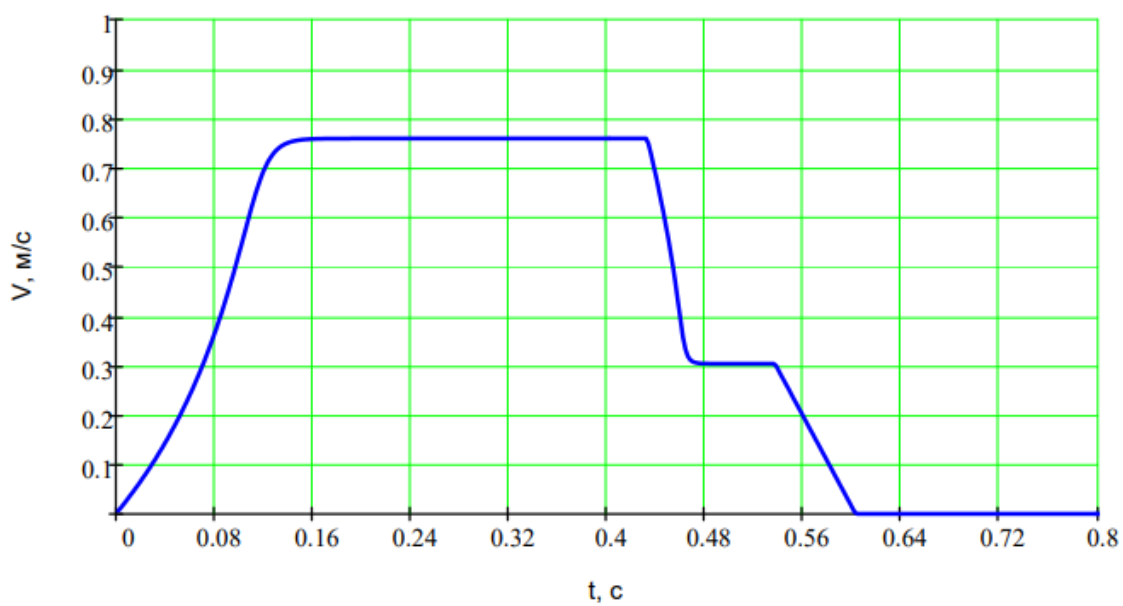


Рис.14 – График зависимости скорости привода от времени

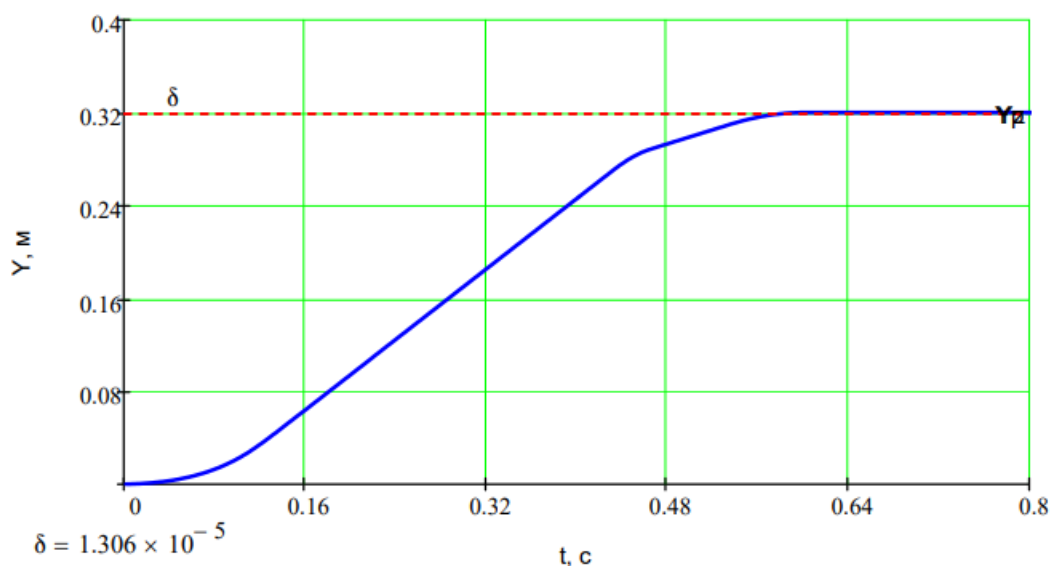


Рис.15 – График зависимости перемещения от времени

Расчет времени перемещения рабочего органа по координатам манипулятора и параметров производительности автоматизированного технологического процесса сборки.

Расположение резьбовых заклепок в детали показаны на **Рис.16**.

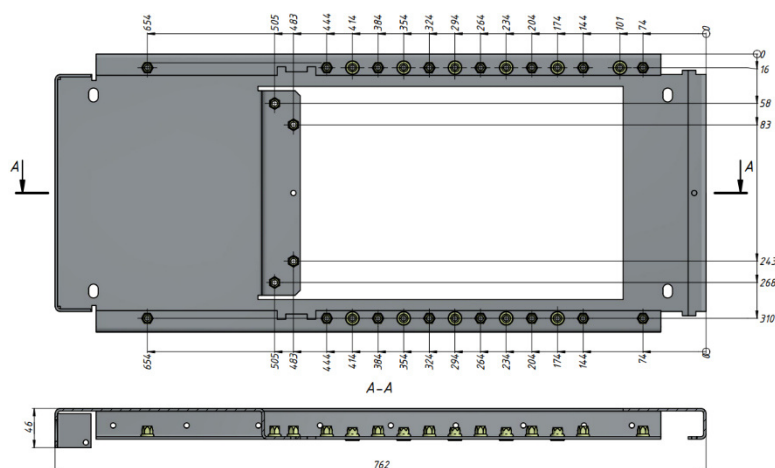


Рис.16 – Координаты резьбовых заклепок

Расчет времени перемещения, при заданной скорости перемещения линейных электромеханических модулей: линейный модуль перемещения координаты X ЕНМХ-ELGC-80-BS-KF – $V=0,67$ м/с; линейный модуль перемещения координаты Y ЕНМХ-ELGC-80-BS-KF – $V=0,54$ м/с;

Шаг 1 – Перемещение по координате Y на 16 мм, для заклепывания верхнего ряда заклепок

N001 X0 Y16 Z0 (0,03 сек)

Шаг 2 - Перемещение по координате X на 74 мм.

N002 X74 Y16 Z0 (0,2 сек)

Шаг 3 – Выполнение операции заклепывания резбовой заклепки

N003 X74 Y16 Z80 (2,5 сек)

N004 X74 Y16 Z0 (0,5 сек)

Шаг 4 - Перемещение по координате X на 27 мм.

N005 X101 Y16 Z0 (0,05 сек)

И далее таким же образом происходит расчет времени перемещения с шага 5 по шаг 32. И далее:

Шаг 33 – Переход к нижнему ряду заклепок

N040 X74 Y310 Z0 (1,2 сек).

Чтобы определить время, затраченное на заклепывание нижнего ряда резбовых заклепок необходимо сложить время, затраченное с выполнения шага 3 по шаг 32 (49,73).

Шаг X – Возврат в исходное положение

N0XX X0 Y0 Z0 (1,9 сек)

Таким образом, время, затраченное на установку 31 заклепки (M8_18_Fe-Zn) равняется 103 секундам.

Расчет роста производительности при переходе на автоматизированную сборку изделий:

$$P = \frac{t_p}{t_a + t_k} = \frac{270}{103 + 20} = 2,19$$

где t_p – время, затраченное на сборку изделия вручную; t_a – время необходимое автоматизированному комплексу для сборки одного изделия; t_k – время, затрачиваемое на перемещение детали на конвейере, принимаем 20 секунд.

Выводы.

1. На основании приведенных в данной статье данных, особенностях компоновочного решения и мехатронных модулей, входящих в создаваемую техническую систему можно сделать вывод о целесообразности реализации данного проекта.

2. Результаты моделирования процессов точности позиционирования, динамики электромеханических приводов и расчетов производительности проектируемого автоматизированного комплекса сборки изделий позволяют с уверенностью ожидать двукратное повышение производительности работы спроектированной технической системы.

Библиографический список

- 1 Карлов А.Г. Идеи, изобретения, инновации в сфере автоматизации технологий и технических систем: учебное пособие / А.Г. Карлов, Н.А. Шпаковский – М.: Центр каталог, 2019. – 536 с.
- 2 Сайт Система автоматической подачи и установки заклёпок для автоматизированных линий: [электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.far-rus.com/systema-avto-podachi-i-ustanovki-zaklepok2.html>
- 3 Лысенко Ю.Д. Механизация и автоматизация сборочно-клепальных работ на базе машин импульсного действия: учеб. пособие / Ю.Д. Лысенко, В.А. Звягинцев. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 76 с.
- 4 Сайт Резьбовые заклёпки. Каталог 2014: [электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.fastbolt.ru/uploads/docs/fastbolt_rivetnut_catalog.pdf
- 5 Сайт Wysokiej wytrzymałości i niezawodne łączenie materiałów: [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.boellhoff.com/ru-ru/produkcja-uslugi/technologie-sborki/rivset-sistemy-ustanowka.php>
- 6 Сайт Профессиональные крепежные изделия и инструменты каталоге представлена продукция GrondGroup (Германия), Avdel (Великобритания) и FAR (Италия). Резьбовые заклёпки: [электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://pmetiz.ru/d/106835/d/rezbovyje-zaklepki-grondgroup.pdf>.

Bibliograficheskiy spisok

- 1 Karlov A.G. Idei, izobreteniya, innovacii v sfere avtomatizacii tekhnologii i tekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie / A.G. Karlov, N.A. SHpakovskij – M.: Centr katalog, 2019. – 536 s.
- 2 Sajt Sistema avtomaticheskoy podachi i ustanovki zaklyopok dlya avtomatizirovannyh linii: [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.far-rus.com/systema-avto-podachi-i-ustanovki-zaklepok2.html>
- 3 Lysenko YU.D. Mekhanizaciya i avtomatizaciya sborochno-klepal'nyh rabot na baze mashin impul'snogo dejstviya: ucheb. posobie / YU.D. Lysenko, V.A. Zvyagincev. – Samara: Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2007. – 76 s.
- 4 Sajt Rez'bovyje zaklyopki. Katalog 2014: [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: https://www.fastbolt.ru/uploads/docs/fastbolt_rivetnut_catalog.pdf
- 5 Sajt Wysokiej wytrzymałości i niezawodne łączenie materiałów: [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.boellhoff.com/ru-ru/produkcja-uslugi/technologie-sborki/rivset-sistemy-ustanowka.php>
- 6 Sajt Professional'nye krepieżhnye izdeliya i instrumenty kataloge predstavlena produkcija GrondGroup (Germaniya), Avdel (Velikobritaniya)

i FAR (Italiya). Rez'bovye zaklepki: [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://pmetiz.ru/d/106835/d/rezbovye-zaklepki-grondgroup.pdf>.

¹Карлов Антон Георгиевич, к.т.н., доцент,
antkar38cam@gmail.com, Россия, Севастополь Севастопольский
государственный университет

²Бочаров Игорь Валерьевич², магистрант, igor55.1234@yandex.ru,
Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

**SUBSTANTIATION AND MODELING OF THE PARAMETERS OF THE
POSITIONING ACCURACY OF THE THREE-COORDINATE MANIPULATOR
OF THE AUTOMATED INSTALLATION COMPLEX OF THREADED RIVETS
DURING THE ASSEMBLY OF CABINETS OF THE ETALON SERIES**

A.G. Karlov, I.V. Bocharov

The analysis of features of automation of technological processes of installation of threaded rivets in the workpiece, which is the basis of a complete switchgear of the Etalon series, is presented. The results of the study and simulation of an electromechanical drive with two-speed control with speed feedback are presented. The analysis of the mechanical characteristics of threaded rivets is carried out, the parameters of the automated process of assembling such rivets are substantiated. The results of calculations and modeling allowed us to estimate the limits of productivity growth of the automated assembly complex in comparison with the basic project.

Keywords: automation of assembly operations; threaded rivet; electromechanical system; pneumatic riveter; positioning accuracy; threaded (wrench) rivet.

*Karlov Anton Georgievich, candidate of technical sciences, docent,
antkar38cam@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university*

*Bocharov Igor Valeryevich, master, igor55.1234@yandex.ru, Russia,
Sevastopol, Sevastopol state university*

ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ НЕЖЕСТКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Бохонский А.И.¹, Головин В.И.², Рыжков А.И.³

Аннотация. Рассмотрены изгибно-крутильные колебания вала конечной изгибной и крутильной жесткости как системы с двумя степенями свободы с приведенной массой к сечению посередине заготовки. Предполагается, что колебания в данной упрощенной модели обусловлены некоторым несовпадением центра жесткости с центром масс вала. Дифференциальные уравнения движения составлены с использованием уравнений Лагранжа второго рода. На численном примере показано, что амплитуды вынужденных крутильных колебаний существенно зависят от угловой скорости вращения заготовки. Предложенная модель может найти применение в технических решениях практического подавления колебаний нежестких заготовок.

Ключевые слова. Нежесткая заготовка, токарная обработка, изгибные колебания, частоты собственных колебаний, линейные и угловые перемещения.

Моделирование процесса автоматической токарной обработки нежестких деталей продолжает оставаться актуальной в настоящее время [1-5]. Задачам обеспечения точности автоматической токарной обработки нежестких деталей посвящены работы [6-9] и другие. Процесс обработки деталей данного класса сопровождается сложным характером колебаний самой заготовки: свободных, вынужденных, параметрических и автоколебаний.

Наиболее общая постановка задачи оптимального управления непрерывным деформируемым состоянием обрабатываемых заготовок предполагает комбинированное управление – по медленному движению в связи с изменением положения режущего инструмента и управлению по быстрому движению (колебаниями, порожденными процессом обработки). Динамические модели должны учитывать изгибные и крутильные колебания заготовки.

Цель исследований – обоснование и анализ упрощенной модели изгибно-крутильных колебаний заготовки при автоматической токарной обработке

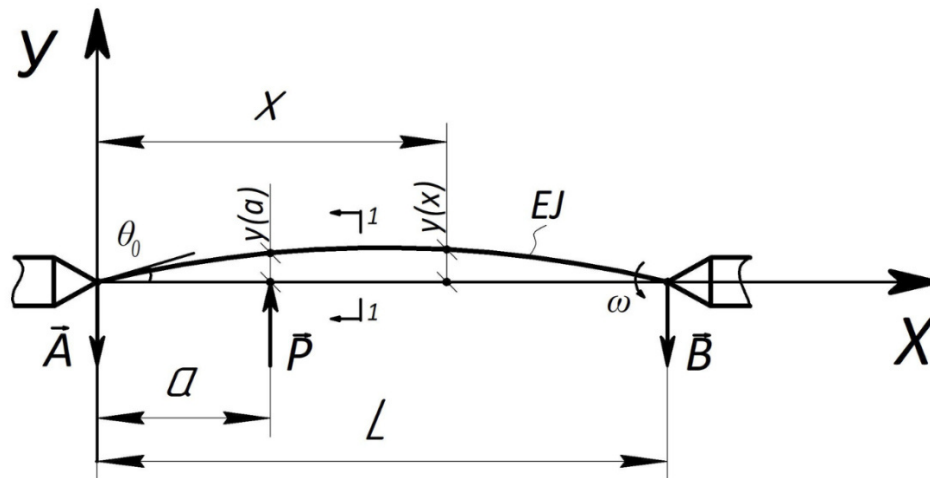


Рис.1 – Схема деформирования нежесткой заготовки при токарной обработке

Схема, отражающая деформируемое состояние заготовки при токарной обработке, изображена на **Рис.1**. Используются обозначения: L – длина заготовки; $a=vt$ – координата силы резания, где v – скорость перемещения режущего инструмента вдоль заготовки; $y(a)$, $y(x)$ – перемещения по направлению радиальной составляющей силы резания в сечениях с координатами a , x ; θ_0 – угол поворота сечения (начальный параметр, при $x=0$); EJ – жесткость при изгибе, где E – модуль упругости первого рода; J – осевой момент инерции поперечного сечения заготовки; ω – угловая скорость вращения заготовки.

Для описания деформированного состояния заготовки использован метод начальных параметров [2-3]. После определения реакций центров начальный параметр θ_0 найден из условия равенства нулю перемещения правого центра. Перемещение сечения заготовки с координатой x (II-го участка) записывается в виде:

$$y(x) = \theta_0 \cdot x + \frac{1}{EJ} \left(-\frac{P(L-a)}{L} \cdot \frac{x^3}{6} + P \frac{(x-a)^3}{6} \right). \quad (1)$$

При $x=L$ из (1) следует выражение для начального параметра:

$$\theta_0 = \frac{Pa(L-a)(2L-a)}{6EJ \cdot L} \quad (2)$$

Максимальное перемещение от изгиба заготовки (при $a=L/2$):

$$y(L/2) = \frac{PL^3}{48EJ}. \quad (3)$$

Из (1) находится перемещение по направлению силы резания:

$$y(a) = \frac{P(L-a)^2 \cdot a^2}{3EJ \cdot L}. \quad (4)$$

Если при $a = L/2$ коэффициент изгибной жесткости заготовки $C_y = \frac{48EJ}{L^3}$, то для $x=a$ он равен $C_y = \frac{3EJ \cdot L}{(L-a)^2 \cdot a^2}$.

При составлении дифференциальных уравнений изгибно-крутильных колебаний заготовки приближенная динамическая модель может быть представлена в виде системы с двумя степенями свободы с сосредоточенной массой по середине заготовки. В качестве обобщенных координат приняты: φ – угол поворота среднего значения заготовки; $y(L/2)$ – перемещение центра масс среднего сечения заготовки по направлению радиальной составляющей силы резания.

На **Рис.2** изображена схема перемещения среднего сечения при изгибе и кручении заготовки.

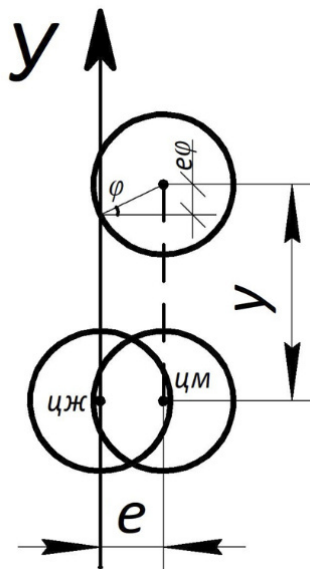


Рис.2 – Схема движения сосредоточенной массы заготовки

На **Рис.2** использованы символы: $цм$ – центр масс среднего сечения заготовки; $цж$ – центр жесткости; e – эксцентриситет центра масс по отношению к центру жесткости. Общее перемещение центра масс

обусловлено изгибными деформациями заготовки и поворотом сечения относительно центра жесткости.

Для принятых допущений уравнения Лагранжа второго рода, описывающие свободные колебания заготовки, записываются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} &= - \frac{\partial \Pi}{\partial y}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где в уравнении (5) кинетическая энергия

$$T = \frac{1}{2} m \dot{y}^2 + \frac{1}{2} J_* \dot{\varphi}^2, \quad (6)$$

m – масса заготовки, приведенная к сосредоточенной ($m = \gamma \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot L$, γ – объемный вес); физический момент инерции, приведенный к центру жесткости $J_* = J_0 + m e^2$, $J_0 = \frac{1}{2} m r^2$, $r = d/2$.

Потенциальная энергия вычисляется следующим образом:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_y (y - e\varphi)^2 + \frac{1}{2} C_\varphi \varphi^2, \quad (6)$$

где $C_y = \frac{48 E J}{L^3}$, E – модуль упругости первого рода; $J = \frac{\pi d^4}{64}$ – осевой момент инерции заготовки; L – длина заготовки; $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$ – полярный момент инерции; C_φ – коэффициент крутильной жесткости.

После преобразований получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, приближенно описывающих свободные изгибно-крутильные колебания заготовки:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} + C_y y - C_y e \cdot \varphi &= 0, \\ J_* \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + (C_\varphi + C_y \cdot e^2) \varphi - C_y e \cdot y &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где J_* – физический момент инерции.

При $a = \frac{L}{2}$ коэффициент изгибной жесткости равен $C_y = \frac{48EJ}{L^3}$.

Уменьшение коэффициента жесткости (увеличение податливости) приводит к уменьшению толщины срезаемого слоя, т.е. к образованию бочкообразности обрабатываемой заготовки.

Частоты собственных колебаний находятся после подстановки частных решений $y = A \sin(kt)$, $\varphi = B \sin(kt)$ в уравнения движения (8) и преобразований, которые приводят к частотному уравнению:

$$k^4 - \frac{-C_y(J + me^2) + C_\varphi m}{m \cdot J} \cdot k^2 - \frac{C_y C_\varphi}{m \cdot J} = 0. \quad (9)$$

Численный пример. Исходные данные: $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $G = 0,4E$; $d = 0,01$ м; $L = 0,4$ м; $\gamma = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; $m = \gamma \frac{\pi d^2}{4} L$; $e = 0,0001$ м. В этом случае частоты собственных колебаний соответственно равны: $k_1 = 561,4$ с⁻¹; $k_2 = 8165,4$ с⁻¹. Линейное перемещение описывается зависимостью:

$$y(t) = A_1 \sin(k_1 t + \alpha_1) + B_1 \sin(k_2 t + \alpha_2) + D_1 \sin(\omega t), \quad (10)$$

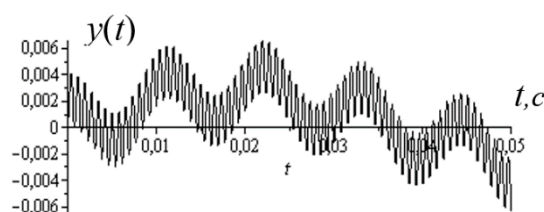
а угловое – зависимостью

$$\varphi(t) = A_1 \rho_1 \sin(k_1 t + \alpha_1) + B_1 \rho_2 \sin(k_2 t + \alpha_2) + D_2 \sin(\omega t), \quad (11)$$

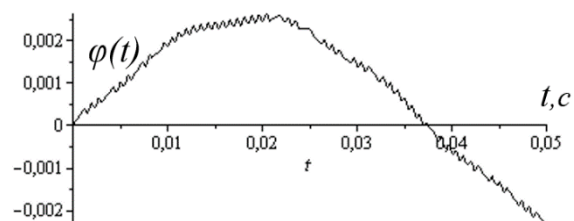
где $\rho_1 = \frac{C_y e}{C_y - m k_1}$, $\rho_2 = \frac{C_y e}{C_y - m k_2}$, ω – частота вращения заготовки.

Параметры $A_1, A_2, B_1, B_2, D_1, D_2$ найдены с использованием начальных условий.

Принято $\omega = 83,78$ с⁻¹. При этом радиальная составляющая силы резания $P_p = 200$ Н, а тангенциальная составляющая $P_\tau = 100$ Н.



а)



б)

**Рис.3 – а) график изгибных колебаний заготовки ($x = L/2$);
б) график крутильных колебаний заготовки**

На **Рис.3** изображены графики вынужденных изгибных и крутильных колебаний заготовки как системы с двумя степенями свободы. Упрощенная модель позволяет анализировать динамическое поведение нежесткой заготовки при учете взаимного влияния двух типов колебаний.

Предложенная простая модель динамики нежесткой заготовки при ее токарной обработке приближенно отражает сложный характер изгибно-крутильных колебаний системы с двумя степенями свободы. Для снижения уровня колебаний, влияющих главным образом на шероховатость поверхности обрабатываемой детали, не исключается применение как пассивных, так и активных (управляемых) динамических гасителей колебаний (с учетом силы резания при ее движении вдоль заготовки).

Библиографический список

1. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 1978. – 248 с.
2. Бохонский А.И. Управление деформированием нежестких деталей при токарной обработке. / А.И. Бохонский, А.Н. Вахмянин. – Севастополь: СевНТУ, 1999. – 240 с.
3. Бохонский А.И. Компенсация перемещений и управление деформированием заготовок при токарной обработке. / А.И. Бохонский, Л.А. Шмидт. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – 109 с.
4. Бохонский, А.И. Управление перемещениями нежестких заготовок с помощью упругих опор при автоматической токарной обработке/ А.И. Бохонский // Изв. ВУЗов. «Машиностроение». – 1985. – № 7. – С. 18–24.
5. Подпоркин В.Г. Обработка нежестких деталей. / В.Г. Подпоркин. – М. – Л.: Машгиз. 1959. – 150 с.
6. Шмидт Л.А. Снижение погрешности процесса токарной обработки нежестких заготовок переменного сечения методом управляемого деформирования [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.13.07 / Л. А. Шмидт ; науч. рук. А. И. Бохонский ; Севастоп. нац. техн. ун-т. - Севастополь, 2009. - 185 л. : ил. - Библиогр.: л. 133-145 (125 назв.).
7. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: СевНТУ, 2007. – 296 с.
8. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.

9. Козлов В.Н. Методическое пособие по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент». / В.Н. Козлов. – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – 131 с.
10. А.И. Бохонский. Образование бочкообразности при токарной обработке нежестких валов / А.И. Бохонский, Е.А. Левченко // Вестник современных технологий. – 2021. – №16 – С. 24-30.

Bibliograficheskij spisok

1. Bazrov B.M. Tekhnologicheskie osnovy proektirovaniya samopodnastraivayushchihsya stankov. / B.M. Bazarov. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 248 s.
2. Bohonskij A.I. Upravlenie deformirovaniem nezhestkih detalej pri tokarnoj obrabotke. / A.I. Bohonskij, A.N. Vahmyanin. – Sevastopol': SevNTU, 1999. – 240 s.
3. Bohonskij A.I. Kompensaciya peremeshchenij i upravlenie deformirovaniem zagotovok pri tokarnoj obrabotke. / A.I. Bohonskij, L.A. SHmidt. – Novokuzneck: NIC MS, 2018. – 109 s.
4. Bohonskij, A.I. Upravlenie peremeshcheniyami nezhestkih zagotovok s pomoshch'yu uprugih opor pri avtomaticheskoy tokarnoj obrabotke/ A.I. Bohonskij // Izv. VUZov. «Mashinostroenie». – 1985. – № 7. – S. 18–24.
5. Podporkin V.G. Obrabotka nezhestkih detalej. / V.G. Podporkin. – M. – L.: Mashgiz. 1959. – 150 s.
6. SHmidt L.A. Snizhenie pogreshnosti processa tokarnoj obrabotki nezhestkih zagotovok peremennogo secheniya metodom upravlyaemogo deformirovaniya [Tekst] : dis. kand. tekhn. nauk : 05.13.07 / L. A. SHmidt ; nauch. ruk. A. I. Bohonskij ; Sevastop. nac. tekhn. un-t. - Sevastopol', 2009. - 185 l. : il. - Bibliogr.: l. 133-145 (125 nazv.).
7. Bohonskij A.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem deformiruemyh ob"ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevskij; Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': SevNTU, 2007. – 296 s.
8. Bohonskij A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischisleniya v mekhanike / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya; Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 212 s.
9. Kozlov V.N. Metodicheskoe posobie po discipline «Rezanie materialov i rezhushchij instrument». / V.N. Kozlov. – Tomsk: Izd. TPU, 2014. – 131 s.
10. A.I. Bohonskij. Obrazovanie bochkoobraznosti pri tokarnoj obrabotke nezhestkih valov / A.I. Bohonskij, E.A. Levchenko // Vestnik sovremennyh tekhnologij. – 2021. – №16 – S. 24-30.

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

²Головин Василий Игоревич, к.т.н., доцент, директор
Политехнического института, golovin@sevsu.ru, Россия,
Севастопольский государственный университет

³Рыжков Александр Игоревич, старший преподаватель,
airyzhkov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

BENDING-TORSIONAL VIBRATIONS OF A FLEXIBLE BLANK FOR AUTOMATED TURNING

A.I. Bokhonsky, V.I. Golovin, A.I. Ryzhkov

Bending-torsional vibrations of a shaft of finite bending and torsional rigidity are considered as a system with two degrees of freedom with a reduced mass to the section in the middle of the workpiece. It is assumed that oscillations in this simplified model are due to some mismatch between the center of rigidity and the center of mass of the shaft. The differential equations of motion are composed using the Lagrange equations of the second kind. A numerical example shows that the amplitudes of forced torsional vibrations depend significantly on the angular velocity of the workpiece rotation. The proposed model can be used in technical solutions for the practical suppression of vibrations of non-rigid workpieces.

Keywords: non-rigid workpiece, turning, bending vibrations, natural vibration frequencies, linear and angular displacements.

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

*Golovin Vasily Igorevich, candidate of technical sciences, docent,
Director of the Polytechnic Institute, golovin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol
State University*

*Ryzhkov Aleksandr Igorevich, senior lecturer, airyzhkov@sevsu.ru,
Russia, Sevastopol State University*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАНИПУЛЯТОРА ТИПА SCARA В MATLAB/SIMULINK ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БИБЛИОТЕК SIMSCAPE

Чаленков Н.И.¹, Невар Г.В.²

Аннотация. Рассматривается построение модели функционирования манипулятора типа SCARA в среде MATLAB/SIMULINK при использовании библиотек Simscape. Приводятся этапы построения и описываются основные элементы, используемые для создания модели. Разработанная модель позволяет определить траекторию движения рабочего органа модуля при известных геометрических, механических и электрических характеристиках его элементов. Приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова. Манипулятор, SCARA-кинематика, модель движения, MATLAB/SIMULINK, Simscape.

Библиотеки Simscape позволяют создавать пользовательские компоненты физического моделирования, а также модели физических систем в среде Simulink. Моделируются такие системы, как электродвигатели, мостовые выпрямители, гидроприводы и системы охлаждения.

Семейство библиотек Simscape состоит из шести продуктов, которые охватывают широкий спектр применений. Каждый из этих продуктов интегрирован в библиотеки Simscape [1-6].

Целью данной работы является разработка модели движения манипулятора типа SCARA с учетом геометрии, механических и электрических характеристик его элементов.

Модель манипулятора строится в несколько этапов:

1. Создание физической системы на основе геометрии манипулятора. На данном этапе из библиотеки Simscape Multibody добавляются геометрические тела, шарниры и иные необходимые компоненты для создания геометрии манипулятора и связи между блоками (**Рис.1**). В добавленных компонентах указываются размеры, масса звена, направление вращения и перемещения, начальное положение.
2. Управление движением манипулятора. Управление происходит путём создания управляющего сигнала, которое возможно, как при использовании стандартной библиотеки компонентов, так и при проектировании более сложной системы управления (например, создание модели двигателя постоянного тока (**Рис.2**)).

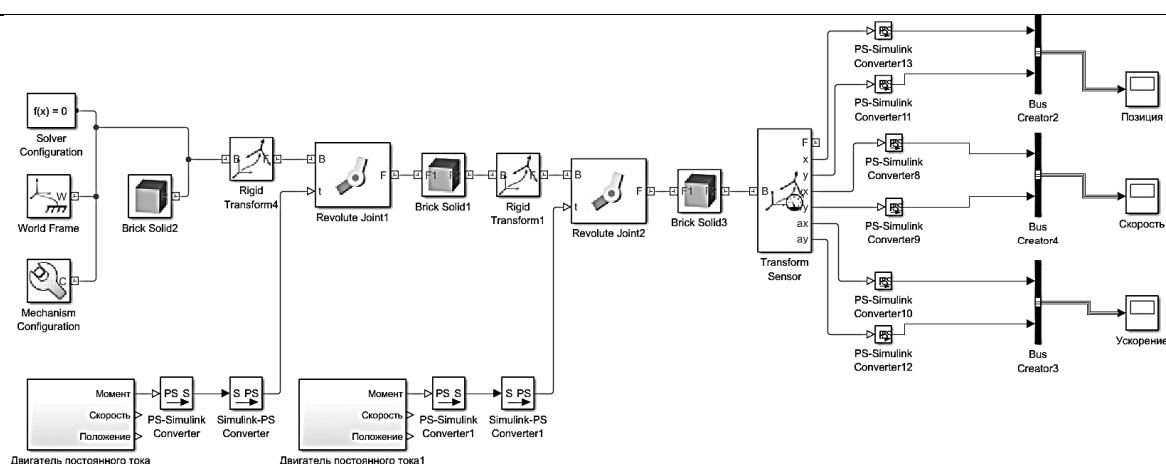


Рис.1 – Модель манипулятора при использовании библиотек Simscape

Модель манипулятора состоит из следующих основных элементов:

1. Revolute Joint – блок, представляющий собой шарнир с одной степенью свободы.
2. Brick Solid – компонент, добавляющий в модель твердотельный элемент с геометрией, инерцией и цветом.
3. Rigid Transform – компонент, позволяющий произвести ориентацию осей ведомого звена относительно базового.

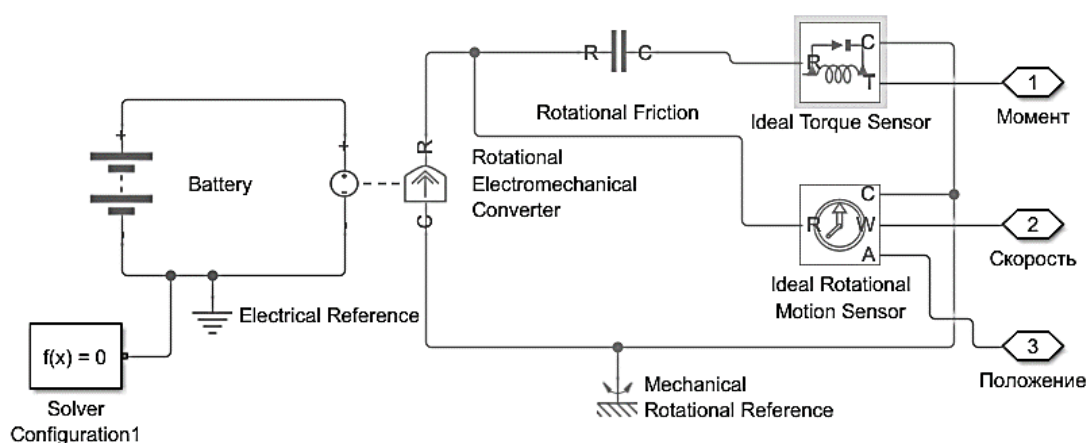


Рис.2 – Модель двигателя постоянного тока при использовании библиотек Simscape

Модель двигателя постоянного тока (ДПТ) состоит из следующих основных компонентов:

1. Rotational Electromechanical Converter – элемент, преобразующий электрический ток во вращательное движение.
2. Rotation Friction – блок, моделирующий трение между двумя вращающимися телами.
3. Ideal Torque Sensor – датчик, позволяющий определить крутящий момент.
4. Ideal Rotational Sensor – датчик, позволяющий определить скорость вращения и положение вала двигателя.

Исходные данные для моделирования следующие:

1. Геометрические параметры:

– Габариты первого и второго плеча манипулятора, $D \times Ш \times В$ – $0.15 \times 0.05 \times 0.05$ м.

– Масса первого и второго плеча манипулятора, m – 1 кг.

– Коэффициент упругости шарнира – $0.06 \text{ Н} \cdot \text{м} / (\text{град} \cdot \text{с})$.

2. Параметры модели ДПТ:

– Напряжение питания, V – 48 В.

– Константа пропорциональности вращательного электромеханического преобразователя, K – $0.1 \text{ В} / (\text{рад} \cdot \text{с})$.

– Момент трения отрыва – $25 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

– Кулоновский момент трения – $20 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Для получения графиков зависимостей перемещений, скоростей и ускорений конечной точки манипулятора использовался компонент Transform Sensor. Графики приведены на **Рис.3-5**.

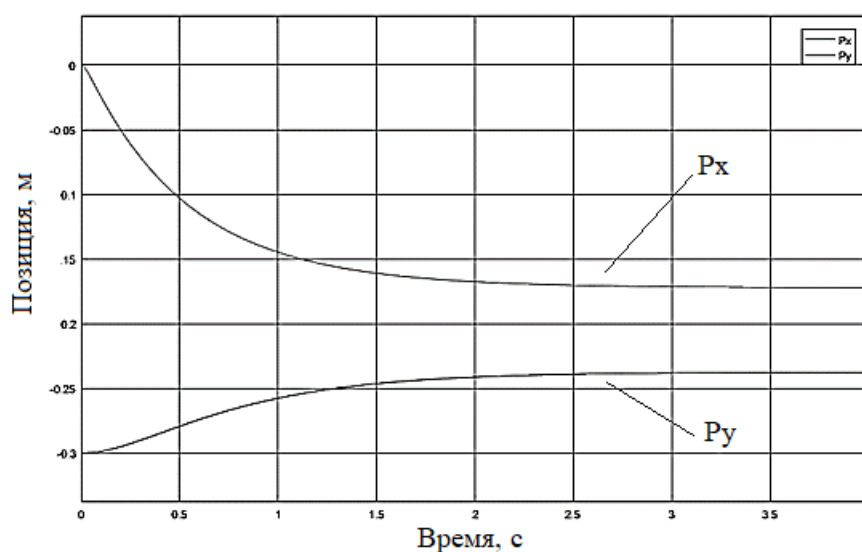


Рис.3 – Графики перемещения конечной точки

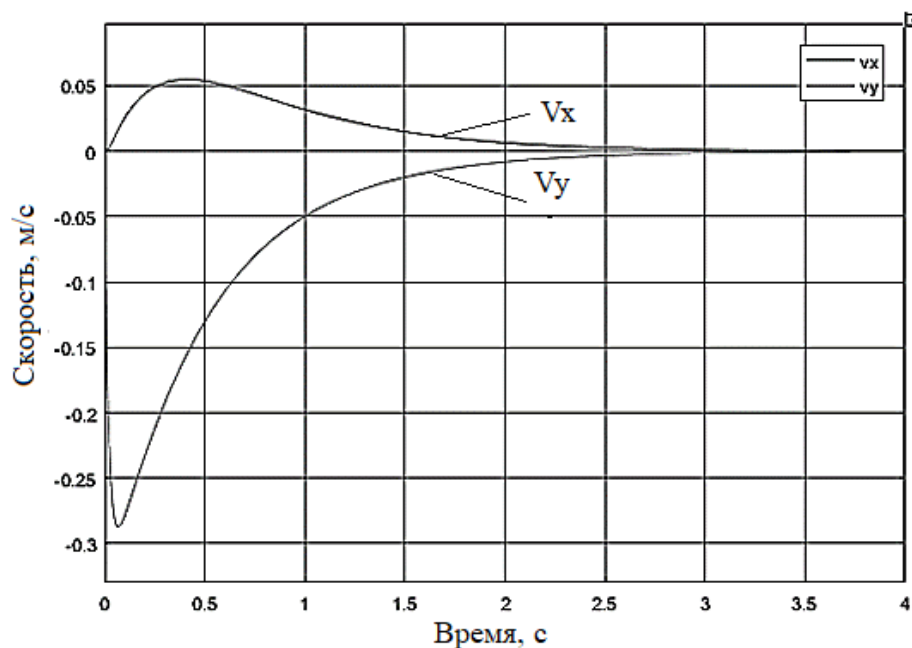


Рис.4 – Графики скоростей конечной точки по осям x и y

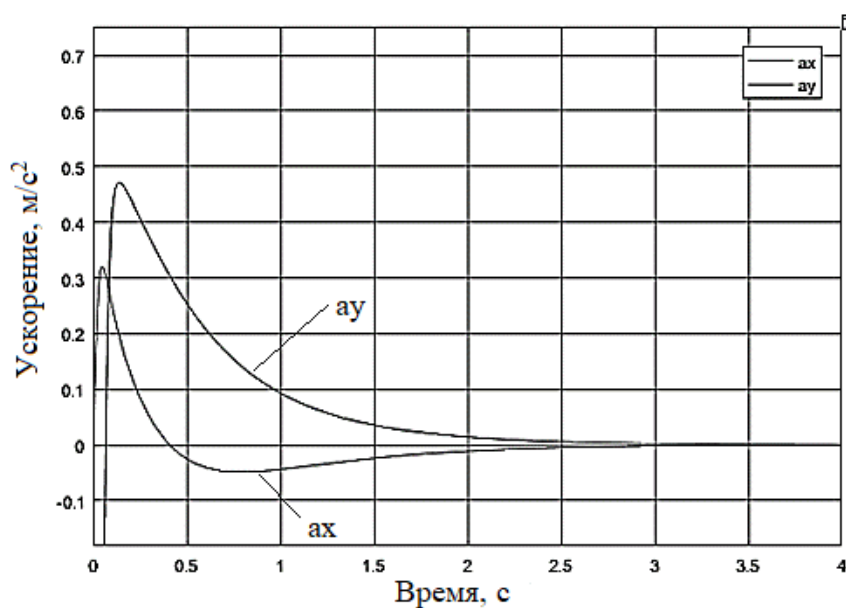


Рис.5 – Графики ускорений конечной точки по осям x и y

Проведенные исследования позволяют оценить динамические характеристики движения рабочего органа манипулятора с учетом моментов, создаваемых приводами, геометрических и механических параметров его элементов.

Библиографический список

1. Борисов И.И. Имитационное моделирование мехатронных систем / И.И. Борисов, С.А. Колубин. – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 103 с.
2. Сайт MathWorks Steve Miller. What is simscape electrical?: [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>, 2020.
3. Сайт MathWorks Steve Miller. What is simscape multibody?: [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/videos/simscape-multibody-overview-117986.html>, 2020.
4. Сайт Multibody Model Anatomy: [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/gs/multibody-model-anatomy.html>.
5. Сайт Rigid Transform. Fixed spatial relationship between frames: [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/rigidtransform.html>.
6. Сайт Revolute Joint. Joint with one revolute primitive: [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/revolutejoint.html>.

Bibliograficheski spisok

1. Borisov I.I. Imitacionnoe modelirovanie mekhatronnyh sistem / I.I. Borisov, S.A. Kolyubin. — SPb: Universitet ITMO, 2020. — 103 с.
2. Sajt MathWorks Steve Miller. What is simscape electrical?: [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>, 2020.
3. Sajt MathWorks Steve Miller. What is simscape multibody?: [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.mathworks.com/videos/simscape-multibody-overview-117986.html>, 2020.
4. Sajt Multibody Model Anatomy: [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/gs/multibody-model-anatomy.html>.
5. Sajt Rigid Transform. Fixed spatial relationship between frames: [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/rigidtransform.html>.
6. Sajt Revolute Joint. Joint with one revolute primitive: [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/revolutejoint.html>.

¹Чаленков Никита Игоревич, ассистент, NICHalenkov@sevsu.ru, Севастополь, Россия, Севастопольский государственный университет

²Невар Галина Валерьевна, ассистент, GVNevar@sevsu.ru, Севастополь, Россия, Севастопольский государственный университет

*SIMULATION OF A SCARA MANIPULATOR IN MATLAB/SIMULINK
USING SIMSCAPE LIBRARIES*

N.I. Chalenkov, G.V. Nevar

The construction of a functioning model of a SCARA type manipulator in the MATLAB/SIMULINK environment using the Simscape libraries is considered. The construction steps are given and the main elements used to create the model are described. The developed model makes it possible to determine the trajectory of the movement of the working body of the module with known geometric, mechanical and electrical characteristics of its elements. The simulation results are presented.

Keywords: manipulator, SCARA kinematics, motion model, MATLAB/SIMULINK, Simscape.

Chalenkov Nikita Igorevich, assistant, NICHalenkov@sevsu.ru, Sevastopol, Russia, Sevastopol State University

Nevar Galina Valerievna, assistant, GVNevar@sevsu.ru, Sevastopol, Russia, Sevastopol State University

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 621.865.8 : 517.97 : 51-74

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЖЕСТКОСТИ РУКИ УПРУГОГО МАНИПУЛЯТОРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Варминская Н.И.

Аннотация. *Использованы оптимальные кососимметричные управления поступательным или вращательным движением телескопического манипулятора конечной жесткости, обеспечивающие абсолютный или относительный покой схвата манипулятора в конечной точке позиционирования; предполагается постоянство частот собственных колебаний руки. Изменение длины руки в процессе работы манипулятора влечет за собой изменение собственных частот колебаний, что может отрицательно отразиться на производительности и точности позиционирования. Предложен способ стабилизации жесткости телескопической руки, основанный на выдвигании элемента руки, согласованном с изменением ее длины в процессе выполнения рабочих операций, позволяющий соблюдать постоянство частоты основного тона.*

Ключевые слова. *Телескопический манипулятор, рука конечной жесткости, управление движением, частота собственных колебаний, прогиб, определение деформаций, метод Мора, стабилизация жесткости руки манипулятора.*

Введение. Теории оптимального управления движением объектов, колебаниям упругих систем посвящены работы [1–5] и другие. Конструирование оптимальных управлений движением объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел рассмотрено в [6,7]. Алгоритмы решения прямых и обратных задач, а также вариационные методы используются для синтеза оптимальных управлений [8]. Однако решение полных обратных задач вариационного исчисления (от функции – к функционалу) и до настоящего времени остается актуальным. Оптимальность управлений, полученных в процессе решения полных обратных задач, доказана в [6–8] и других работах.

Ряд технических приложений конструирования оптимальных управлений движением различных объектов (в том числе, телескопических и антропоморфных манипуляторов конечной жесткости) и их применения в технике показан в работах [9,10].

В [11,12] отмечено, что с ростом степени полинома управления

(переносного ускорения) энергия, необходимая для реализации движения, уменьшается. В [13] сформулирован принцип наименьшего принуждения, отражающий свойство снижения энергоемкости оптимального управления движением объекта из исходного в конечное состояние покоя при заданном времени движения и расстоянии.

Для практической реализации предлагаемых оптимальных управлений рассмотрены варианты замены другими управлениями, эквивалентными по энергоемкости [14]. В частности, в [15] предложено использовать пневмопривод с управляемым дросселированием для реализации оптимальных управлений, заданных в виде полинома.

Кососимметричные оптимальные управления переносным движением упругих объектов с конечным и бесконечным числом степеней свободы, рассмотренные в работах [6 – 15], предполагают, что жесткость и, следовательно, частоты собственных колебаний рассматриваемого объекта постоянны. Однако при работе, например, манипуляторов конечной жесткости изменяется их геометрическая конфигурация и, соответственно, частоты колебаний, что не позволяет непосредственно применять указанные кососимметричные оптимальные управления.

В [16] предложен вариант стабилизации жесткости консольного нежесткого стержня в связи с изменением положения движущейся вдоль стержня массы путем непрерывного изменения осевого момента инерции поперечного сечения стержня за счет вращения отдельных элементов относительно продольной оси. В [17] стабилизация жесткости телескопической руки осуществлялся за счет согласованного выдвижения элемента руки при изменении ее длины при использовании оптимального управления в виде гармонической функции.

Следует отметить, что при проектировании манипуляторов минимальной массы для стабилизации жесткости (или спектра частот собственных колебаний) не исключается непрерывное управление пространственной конфигурацией манипулятора согласно реализуемой форме движения стержневой системы.

Цель исследований – поиск закона движения дополнительного элемента телескопической руки манипулятора, который обеспечит в произвольный момент времени постоянство частоты первого тона колебаний.

Основная часть

Идея изменения конфигурации руки состоит в таком выдвижении звеньев в направлении оси x , что в произвольный момент времени частота первого тона колебаний остается постоянной (**Рис.1**).

Для исходного состояния руки без учета ее распределенной массы

частота $k = \sqrt{c/m}$, где c – коэффициент жесткости; m – сосредоточенная масса. прогиб конца консоли от единичной силы ($P = 1$ Н) равен $f = \frac{x_0^3}{3EJ_1}$, где x_0 – длина руки; E – модуль упругости первого рода; J_1 – осевой момент инерции поперечного круглого сечения руки;

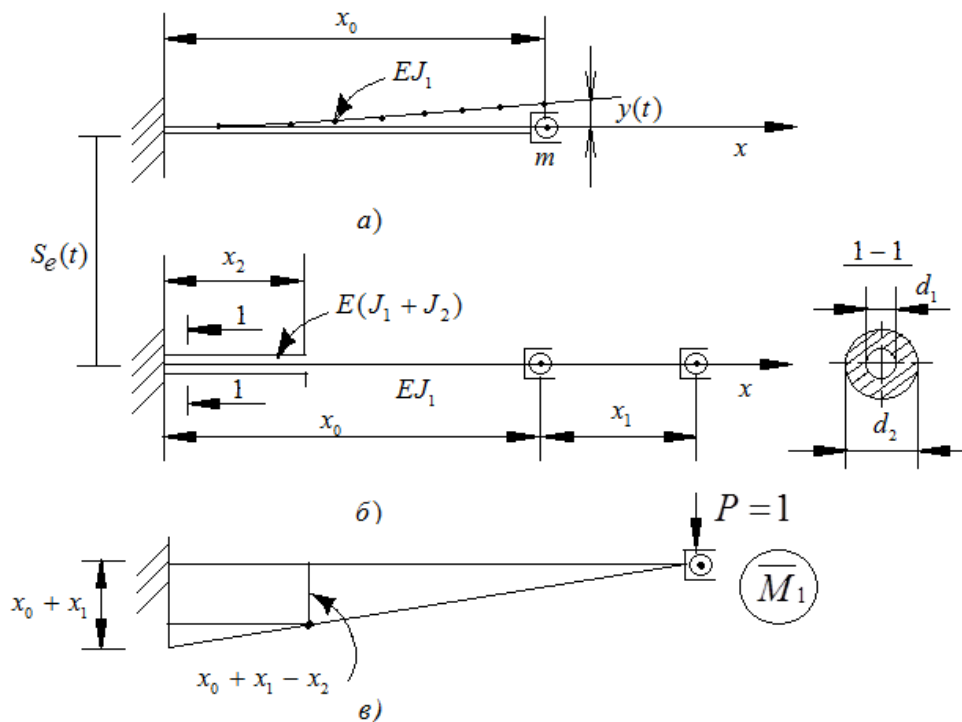
$$J_1 = \frac{\pi d_1^4}{64}.$$


Рис.1 – Схемы руки: а) исходное состояние, б) переносное поступательное движение с выдвиганием звеньев, в) эпюра изгибающего момента от единичной силы (в произвольный момент времени)

В произвольный момент времени прогиб руки от силы P (Рис.1б) определен с помощью интеграла Мора

$$f_1 = \sum_{i=1}^2 \int_s \frac{\bar{M}_1 \bar{M}_1 ds}{EJ_i}, \quad (1)$$

который вычислен по способу Верещагина:

$$f_1 = \frac{(x_0 + x_1 - x_2)^3}{3EJ_1} + \frac{(x_0 + x_1 - x_2)^2 x_2}{E(J_1 + J_2)} + \frac{x_2^3}{3E(J_1 + J_2)}. \quad (2)$$

Из равенства $f_1 = f$ (с учетом $J_1 = J_2$) после преобразований следует

нелинейное алгебраическое уравнение:

$$2(x_0 + x_1 - x_2)^3 + 3(x_0 + x_1 - x_2)^2 x_2 + x_2^3 - 2x_0^3 = 0. \quad (3)$$

При заданном исходном значении длины консоли x_0 и законе движения $x_1(t)$, который по времени согласуется с переносным поступательным движением, из нелинейного функционального уравнения (3) находится закон движения $x_2(t)$ дополнительного элемента, стабилизирующего изгибную жесткость руки, т.е. обеспечивающего постоянство частоты собственных колебаний.

В [7] при реверсионном конструировании оптимального управления без предварительного задания критерия оптимальности для произвольной степени используемого полинома и движении из состояния покоя управление (переносное ускорение) соответствует универсальной зависимости:

$$U_e = \frac{2L(n+2)}{T^2} \left(\frac{T-2t}{T} \right)^n, \quad (4)$$

где L – максимальное перемещение, T – время движения, n – степень полинома.

Из (4) следуют выражения для скорости и перемещения:

$$V_e = \int_0^T U_e dt, \quad S_e = \int_0^T V_e dt, \\ V_e = \frac{L(n+2)}{T(n+1)} \left(1 - \left(\frac{T-2t}{T} \right)^{n+1} \right), \quad S_e = \frac{L}{2(n+1)} \left(\left(\frac{T-2t}{T} \right)^{n+2} + \frac{2nt}{T} + \frac{4t}{T} - 1 \right). \quad (5)$$

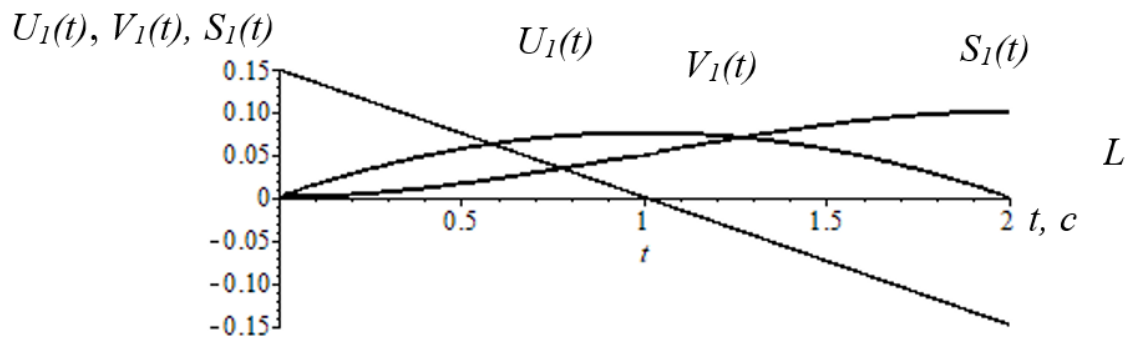
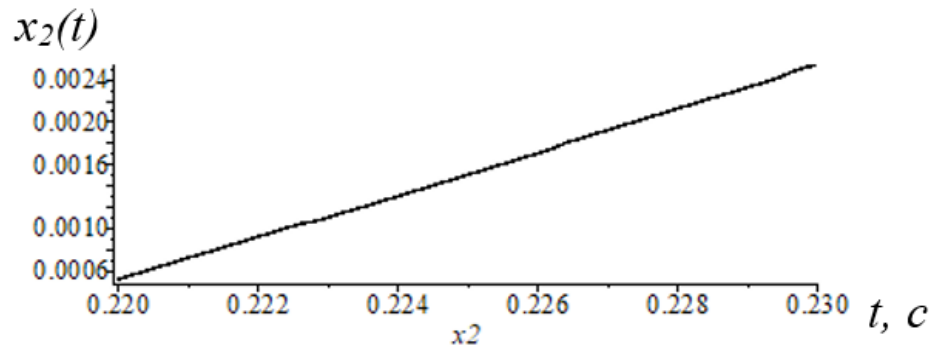
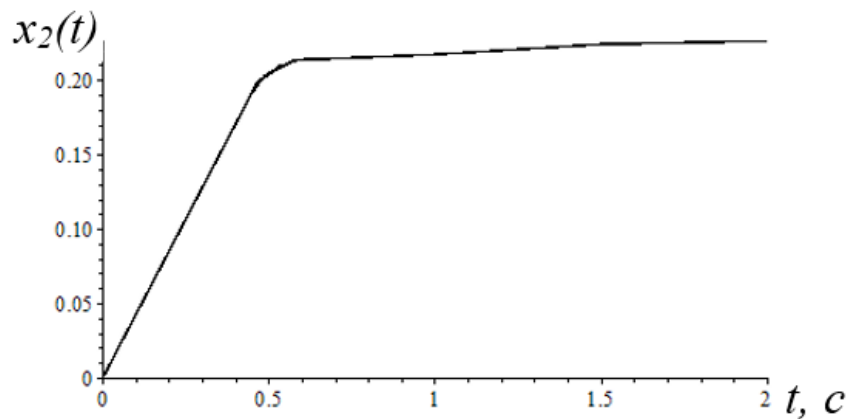


Рис.2 – Графики переносного движения $U_I(t)$, $V_I(t)$, $S_I(t)$



а)



б)

Рис.3 – Графики изменения длины дополнительного звена манипулятора $x_2(t)$:
а) на отдельном участке;
б) на всем промежутке движения

При $n = 1$ классическое управление [18] следует из зависимостей (4), (5):

$$U_1(t) = \frac{6L(n+2)}{T^2} \left(\frac{T-2t}{T} \right), \quad V_1(t) = \frac{3L}{2T} \left(1 - \left(\frac{T-2t}{T} \right)^2 \right),$$

$$S_1(t) = \frac{L}{4} \left(\left(\frac{T-2t}{T} \right)^3 + \frac{6t}{T} - 1 \right). \quad (6)$$

Графики функций (6) (для $L = 0,1$ м; $T = 2$ с) представлены на **Рис.2**.

С использованием для закона выдвижения руки $x_1(t)$ выражения $S_1(t)$ из (6) построены графики перемещения дополнительного элемента $x_2(t)$ на

отдельных участках и на всем промежутке движения, которые представлены на **Рис.3** (для $x_0 = 0,1$ м; $L = 0,1$ м; $T = 2$ с).

Выводы. Современные механические исполнительные органы манипуляторов представляют собой сложные пространственные стержневые конструкции традиционно с весьма жесткими элементами. При значительном снижении массы и жесткости конструкций крупногабаритных манипуляторов в процессе выполнения рабочих операций изменяется спектр частот собственных колебаний системы, который зависит от практической реализации формы движения при выполнении технологических операций.

Представленные результаты исследований подтверждают возможность регулирования жесткости руки с целью стабилизации спектра частот собственных колебаний; перемещение дополнительного элемента согласуется с требуемым движением – изменением общей конфигурации руки манипулятора.

Библиографический список

1. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. школа, 1982. – 116 с.
2. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
4. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 236 с.
5. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
6. Бохонский А.И. Конструирование оптимального управления движением объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – С. 70 – 76.
7. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – С-Пб.: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
8. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.
9. Бохонский А.И. Оптимальное управление движением деформируемых

-
- объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский. – Севастополь: СевНТУ, 2007. – 296с.
10. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 170 с.
 11. Бохонский А.И. Оценка энергопотребления для оптимального управления движением объекта (Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // ICMTMTE IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. (<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044093>).
 12. Бохонский А.И. Минимальная энергия оптимального управления для достижения цели движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2020. – №9. – С. 5-11.
 13. Бохонский А.И. Минимальное энергетическое принуждение для достижения цели управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – № 28. – С. 30-36.
 14. Бохонский А.И. Эквивалентные по энергоемкости управления движением объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2021. – №4(16). – С. 3-11.
 15. Бохонский А.И. Снижение энергии на движение объекта при использовании пневмопривода с оптимальным управлением дросселированием / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Journal of Advanced Research in Natural Science (Журнал передовых исследований в области естествознания). – 2021. – №14. – С. 8-13.
 16. Бохонский А.И. Стабилизация жесткости телескопической руки манипулятора / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Подъемно-транспортная техника. – 2004. – № 3. – С. 41-46.
 17. Бохонский А.И. Стабилизация частоты собственных колебаний при изменении геометрии упругой телескопической руки манипулятора / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Вестник современных технологий. – 2020. – № 3(19). – С. 19-23.
 18. Солодовников В.В. Основы теории и элементы системы автоматического регулирования: учеб. пособие / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Karnovskij I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemyh sistem / I.A. Karnovskij, YU.M. Pochtman. – K.: Vyssh. shkola, 1982. – 116 s.
2. Krasovskij N.N. Teoriya upravleniya dvizheniem / N.N. Krasovskij. – M.: Nauka, 1968. – 476 s.
3. Krut'ko P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemyh sistem: linejnye modeli / P.D. Krut'ko. – M.: Nauka, 1987. – 304 s.
4. Troickij V.A. Optimal'nye processy kolebanij mekhanicheskikh sistem / V.A. Troickij. – L.: Mashinostroenie, 1976. – 236 s.
5. CHernous'ko F.L. Upravlenie kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, P.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 s.
6. Bohonskij A.I. Konstruirovanie optimal'nogo upravleniya dvizheniem ob"ektov kak absolyutno tverdyh i deformiruemyh tel / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2016. – S. 70 – 76.
7. Bohonskij A.I. Konstruirovanie optimal'nyh upravlenij peremeshcheniem uprugih ob"ektov / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – S-Pb.: NIC MS, 2020. – 120 s.
8. Bohonskij A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischisleniya v mekhanike / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 212 s.
9. Bohonskij A.I. Optimal'noe upravlenie dvizheniem deformiruemyh ob"ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevskij. – Sevastopol': SevNTU, 2007. – 296s.
10. Bohonskij A.I. Mekhanika upravlyaemogo dvizheniya ob"ektov / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya. – M.: INFRA-M, 2021. – 170 s.
11. Bohonskij A.I. Ocenka energopotrebleniya dlya optimal'nogo upravleniya dvizheniem ob"ekta (Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // ICMTMTE IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. (<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044093>).
12. Bohonskij A.I. Minimal'naya energiya optimal'nogo upravleniya dlya dostizheniya celi dvizheniya ob"ekta / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii. – 2020. – №9. – S. 5-11.
13. Bohonskij A.I. Minimal'noe energeticheskoe prinuzhdenie dlya dostizheniya celi upravlyaemogo dvizheniya ob"ekta / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – № 28. – S. 30-36.

14. Bohonskij A.I. Ekvivalentnye po energoemkosti upravleniya dvizheniem ob"ektov / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii. – 2021. – №4(16). – S. 3-11.
15. Bohonskij A.I. Snizhenie energii na dvizhenie ob"ekta pri ispol'zovanii pnevmoprivoda s optimal'nyim upravleniem drosselirovaniem / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Journal of Advanced Research in Natural Science (ZHurnal peredovyh issledovanij v oblasti estestvoznaniya). – 2021. – №14. – S. 8-13.
16. Bohonskij A.I. Stabilizaciya zhestkosti teleskopicheskoy ruki manipulyatora / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Pod"emno-transportnaya tekhnika. – 2004. – № 3. – S. 41-46.
17. Bohonskij A.I. Stabilizaciya chastoty sobstvennyh kolebanij pri izmenenii geometrii uprugoj teleskopicheskoy ruki manipulyatora / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Vestnik sovremennyh tekhnologij. – 2020. – № 3(19). – S. 19-23.
18. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementy sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya: ucheb. posobie / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Yakovlev. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 536 s.

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

*STABILIZATION OF THE RIGIDITY OF THE ELASTIC MANIPULATOR
WHEN ITS GEOMETRIC PARAMETERS ARE CHANGED*

N.I. Varminskaya

The use of optimal skew-symmetric controls for the translational or rotational motion of a telescopic manipulator of finite rigidity, which provide absolute or relative quiescence of the manipulator gripper at the end point of positioning, assumes the constancy of the frequency of natural oscillations of the arm. Changing the length of the arm during the operation of the manipulator entails a change in natural oscillation frequencies, which can adversely affect performance and positioning accuracy. A method for stabilizing the stiffness of a telescopic arm is proposed, based on the extension of the arm element, consistent with the change in its length in the process of performing work operations, which makes it possible to maintain the constancy of the fundamental tone frequency.

Keywords: telescopic manipulator, arm of finite rigidity, control of arm

movement, frequency of natural oscillations, deflection, determination of displacements, Mohr's method, stabilization of manipulator arm rigidity.

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

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИБКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ С ПОВТОРНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОНТРОЛЯ

Балакин И.А.¹, Балакина Н.А.²

Аннотация. Рассмотрена структура гибкой автоматизированной линии с повторным обслуживанием, предложена ее имитационная модель. Приведен листинг программы на языке GPSS и блок-схема ее основного сегмента. Проведен анализ результатов моделирования, показавший возможности увеличения производительности гибкой автоматизированной линии при использовании повторного обслуживания.

Ключевые слова. Гибкое производство, автоматизированная линия, имитационное моделирование, повторное обслуживание, производительность.

Производительность промышленных систем наравне с их надежностью является одним из основных параметров функционирования таких систем. Ее прогнозирование позволяет обеспечить правильное экономическое обоснование использования тех или иных систем при производстве различных изделий. Решение задач связанных с прогнозированием различных технико-экономических показателей производственных систем обычно осуществляют на основе моделирования. Одним из возможных вариантов является имитационное моделирование, которое позволяет с достаточной точностью описать реальную систему [1].

В современном производстве при изготовлении деталей партиями, часто используются гибкие автоматизированные линии (ГАЛ), имеющие в своей структуре накопители. Повторное обслуживание в таких линиях может использоваться, когда технологический процесс требует повторной обработки изделия после контроля в случае обнаружения исправимого брака.

Различные структуры автоматизированных линий приводятся в [1]. Построение моделей автоматизированных линий с возвратом продукции на повторное обслуживание рассмотрено в [2-12]. Однако при этом остается ряд неисследованных вопросов, связанных с функционированием ГАЛ, при возврате продукции только с последней ячейки на необходимую и учете выполнения контрольных операций. Например, контроль оптических деталей при их изготовлении после операций полировки. В

случае обнаружения брака, для таких деталей повторно выполняются операция шлифования или полировки, что позволяет получить на выходе годные детали.

Цель работы – анализ функционирования гибкой автоматизированной линии с повторным обслуживанием по результатам контроля, на основе имитационного моделирования.

Рассмотрим ГАЛ с повторным обслуживанием (ГАЛПО), структурная схема которой изображена на **Рис.1**. Технологические ячейки, обозначенные ТЯ1, ТЯ2, ТЯ3, ТЯ4, являются основными ячейками для производства продукции. Н2, Н3, Н4 – накопители, расположенные между технологическими ячейками. КСУ – контрольно-сортировочное устройство, предназначенное для контроля соответствия продукции на выходе последней ячейки и передачи продукции для повторного обслуживания на ТЯ3, ТЯ4 или на выход линии.

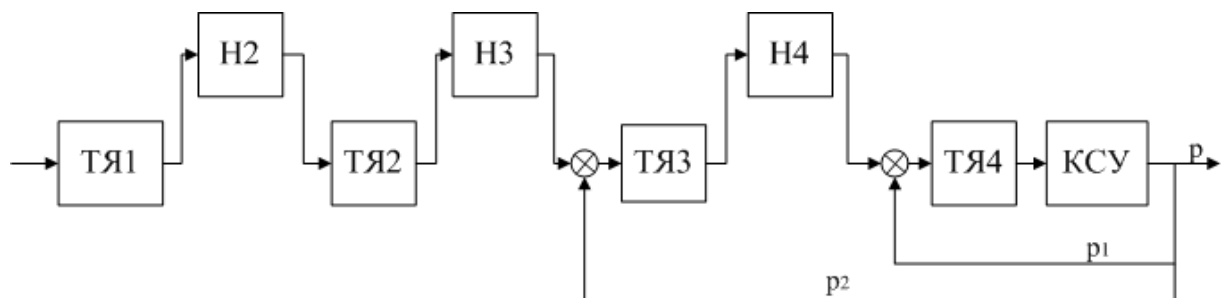


Рис.1 – Структурная схема ГАЛ с возвратом продукции на повторное обслуживание

Задача ставится следующим образом: по известным функциям распределения времени обслуживания продукции на технологических ячейках ТЯ1, ТЯ2, ТЯ3, ТЯ4 и контрольно-сортировочного устройства КСУ, необходимо определить производительность ГАЛПО. Известно, что вероятность брака на выходе последней ячейки зависит от вида брака и технологической операции на которой осуществляется исправление обнаруженного дефекта. Соответственно p_1 – вероятность брака которую можно исправить на ТЯ4; p_2 – вероятность брака которую можно исправить на ТЯ3; p – вероятность получения на выходе линии годной продукции. Причем $p_1 + p_2 = 1 - p$. При построении модели также учитывались показатели надежности основного оборудования, накопителей и контрольно-сортировочного устройства. При моделировании ГАЛПО были сделаны следующие предположения: параметры потоков отказов и восстановлений распределены по

экспоненциальному закону, времена обслуживания на ТЯ и КСУ задаются средними значениями.

При построении имитационной модели (ИМ) приняты следующие допущения.

1. Продукция непрерывно подается на вход линии, а с выхода постоянно убирается.

2. Продукция, поступающая на повторное обслуживание, имеет приоритет.

ИМ ГАЛПО состоит из следующих сегментов:

1) сегмент 1, описывает обслуживание продукции при ее прохождении по линии в соответствии с технологическим процессом;

2) сегменты 2, 3, 4, 5 описывают процесс отказов и восстановлений ТЯ;

3) сегменты 6, 7, 8 описывают процесс отказов и восстановлений накопителей;

4) сегмент 9 описывает процесс отказов и восстановлений КСУ.

Блок-диаграмма GPSS первого сегмента показана на **Рис.2**.

Текст программы, описывающий структурную схему ГАЛПО, представленную на **Рис.1**, приведен ниже.

```
*****
; Модель ГАЛ: 4 ГПМ и 3 накопителя с КСА в конце линии (контроль оптических
; деталей (полировка)). Передача на исправления на ТЯ3 или ТЯ4. Единица
; времени 1 час
; параметры отказов и восстановлений технологического оборудования
*****
t_otk_o EQU 0.5; среднее время наработки на отказ (распределение
экспоненциальное) основного оборудования
t_vost_o EQU 2; среднее время восстановления основного оборудования
t_ot_k EQU 0.05 ; среднее время наработки на отказ (распределение
экспоненциальное) контрольного оборудования
t_vost_k EQU 5; среднее время восстановления контрольного оборудования
*****
STOR1 STORAGE 30; ёмкость накопителя 2
STOR2 STORAGE 30; ёмкость накопителя 3
STOR3 STORAGE 30; ёмкость накопителя 4
STOR4 STORAGE 1; ёмкость фиктивного накопителя для бракованных деталей на ТЯ3
ngen EQU 2 ; номер генератора
t_ob EQU 60/60 ; время обслуживания ТЯ
ver_br1 EQU 0.1 ; вероятность брака на устройствах
ver_br2 EQU 0.05 ; вероятность брака на устройствах
t_iz EQU 0.5/60 ; время измерения
*****
* Model Segment 1
*****
GENERATE ,,,1
Lab1 GATE NU REFASC1 ; проверка исправности ТЯ1
SEIZE ASC1 ; занять ТЯ1
ADVANCE t_ob ; обслуживание заявки
GATE NU REFNAK2 ; проверка исправности накопителя 2
```

Имитационная модель гибкой автоматизированной линии с повторным обслуживанием по результатам контроля

```

GATE SNF  STOR1      ; проверка заполненности накопителя 2
RELEASE   ASC1      ; освободить ТЯ1
SPLIT     1,Lab1
ENTER     STOR1      ; занять накопитель 2
GATE NU   REFASC2    ; проверка исправности ТЯ2
GATE NU   ASC2       ; проверка незанятости ТЯ2
GATE NU   REFNAK2    ; проверка исправности накопителя 2
LEAVE     STOR1      ; освободить накопитель 2
SEIZE     ASC2       ; занять ТЯ2
ADVANCE   t_ob       ; обслуживание заявки
GATE NU   REFNAK3    ; проверка исправности накопителя 3
GATE SNF  STOR2      ; проверка заполненности накопителя 3
RELEASE   ASC2       ; освобождение ТЯ2
ENTER     STOR2      ; занять накопитель 3
GATE NU   REFASC3    ; проверка исправности ТЯ3
GATE NU   ASC3       ; проверка незанятости ТЯ3
GATE NU   REFNAK3    ; проверка исправности накопителя 3
GATE SNF  STOR4      ; проверка заполненности фиктивного накопителя
LEAVE     STOR2      ; освободить накопитель 3
TRANSFER  ,Ob_3; передача транзакта на обслуживание на ТЯ3
Brak3     GATE NU   REFASC3 ; проверка исправности ТЯ3
GATE NU   ASC3       ; проверка незанятости ТЯ3
ENTER     STOR4      ; занять фиктивный накопитель
LEAVE     STOR4      ; освободить накопитель фиктивный накопитель
RELEASE   ASC4
Ob_3      TRANSFER  ,Ob_31; передача транзакта на обслуживание на ТЯ3
Ob_31     GATE SNF  STOR4 ; проверка заполненности фиктивного накопителя
SEIZE     ASC3       ; занять ТЯ3
ADVANCE   t_ob       ; обслуживание заявки
GATE NU   REFNAK4    ; проверка исправности накопителя 4
GATE SNF  STOR3      ; проверка заполненности накопителя 4
RELEASE   ASC3       ; освобождение ТЯ3
ENTER     STOR3      ; занять накопитель 4
GATE NU   REFASC4    ; проверка исправности ТЯ4
GATE NU   ASC4       ; проверка незанятости ТЯ4
GATE NU   REFNAK4    ; проверка исправности накопителя 4
LEAVE     STOR3      ; освободить накопитель 4
Brak4     SEIZE     ASC4 ; занять ТЯ4
ADVANCE   t_ob       ; обслуживание заявки (полировка)
GATE NU   REFKSA     ; проверка исправности KCA
SEIZE     KSA        ; занять KCA
ADVANCE   0.0167     ; обслуживание заявки на KCA
GATE NU   REFASC4    ; проверка исправности ТЯ4
GATE SNF  STOR4      ; проверка заполненности фиктивного накопителя
RELEASE   KSA        ; освобождение KCA
TRANSFER  ver_br1,,Brak4
TRANSFER  ver_br2,,Brak3
RELEASE   ASC4       ; освобождение ТЯ4
SAVEVALUE ALLPART+,1 ; счётчик заявок
SAVEVALUE pwline,(10000/AC1)
TERMINATE 1

```

START 10000

*

Model Segment 2

* Пребывание устройства ASC1 в отказе. Занятие заявкой

* устройства REFASC1 означает, что устройство отказало.

* Время обслуживания заявки есть время восстановления ASC1.

```

*****
    GENERATE      (Exponential(ngen,0,1/t_otk_o))
    SEIZE         REFASC1
    ADVANCE       (Exponential(ngen,0,1/t_vost_o))
    RELEASE       REFASC1
    SAVEVALUE     COUNT1+,1          ; счётчик количества отказов ТЯ1
    TERMINATE
*****
*   Model Segment 3
*****
    GENERATE      (Exponential(ngen,0,1/t_otk_o))
    SEIZE         REFASC2
    ADVANCE       (Exponential(ngen,0,1/t_vost_o))
    RELEASE       REFASC2
    SAVEVALUE     COUNT2+,1          ; счётчик количества отказов ТЯ2
    TERMINATE
*****
*   Model Segment 4
*****
    GENERATE      (Exponential(ngen,0,1/t_otk_o))
    SEIZE         REFASC3
    ADVANCE       (Exponential(ngen,0,1/t_vost_o))
    RELEASE       REFASC3
    SAVEVALUE     COUNT3+,1          ; счётчик количества отказов ТЯ3
    TERMINATE
*****
*   Model Segment 5
*****
    GENERATE      (Exponential(ngen,0,1/t_otk_o))
    SEIZE         REFASC4
    ADVANCE       (Exponential(ngen,0,1/t_vost_o))
    RELEASE       REFASC4
    SAVEVALUE     COUNT4+,1          ; счётчик количества отказов ТЯ4
    TERMINATE
*****
*   Model Segment 6
*****
    GENERATE      (Exponential(ngen,0,1/0.02))
    SEIZE         REFNAK2
    ADVANCE       (Exponential(ngen,0,1/20))
    RELEASE       REFNAK2
    SAVEVALUE     COUNT5+,1          ; счётчик количества отказов накопителя 2
    TERMINATE
*****
*   Model Segment 7
*****
    GENERATE      (Exponential(ngen,0,1/0.02))
    SEIZE         REFNAK3
    ADVANCE       (Exponential(ngen,0,1/20))
    RELEASE       REFNAK3
    SAVEVALUE     COUNT6+,1          ; счётчик количества отказов накопителя 3
    TERMINATE
*****
*   Model Segment 8
*****
    GENERATE      (Exponential(ngen,0,1/0.02))
    SEIZE         REFNAK4

```

```

ADVANCE      (Exponential(ngen,0,1/20))
RELEASE      REFNAK4
SAVEVALUE    COUNT7+,1          ; счётчик количества отказов
накопителя 4
TERMINATE
*****
*      Model Segment 9
*****
GENERATE      (Exponential(ngen,0,1/t_ot_k))
SEIZE         REFKSA
ADVANCE      (Exponential(ngen,0,1/t_vost_k))
RELEASE      REFKSA
SAVEVALUE    COUNT8+,1 ; счётчик количества отказов KCA
TERMINATE

```

При имитационном моделировании каждой единице продукции, поступающей на вход ГАЛПО, соответствует транзакт. Транзакт моделируется блоком GENERATE и в дальнейшем расщепляется с помощью блока SPLIT. Каждая технологическая ячейка и контрольно-сортировочное устройство моделируется с помощью объекта языка GPSS “устройство” путем занятия и освобождения транзактом соответствующего элемента (блок SIEZE и блок RELEASE), причем технологические ячейки в представленной имитационной модели имеют обозначение ASCi, накопители NAKi, а КСУ – KSA. Время обслуживания, имитируется блоками ADVANCE обеспечивающим задержку транзакта на заданное время.

Накопители моделируются таким объектом, как “многоканальное устройство” (блок ENTER имитирует поступление транзактов в накопитель, а блок LEAVE – освобождение одного из каналов). Накопители имеют имена STORi. В модели предполагается проверка возможности продвижения транзакта перед каждым входом в блоки SIEZE, RELEASE, ENTER, LEAVE.

Вход в блок SIEZE возможен, если i-е устройство свободно, исправно и предыдущем накопителе есть транзакты. Освобождение i-го устройства (RELEASE) возможно, если оно работоспособно и следующий накопитель не полон. Вход в блок ENTER возможен, если i-й накопитель не полон и i – 1-я ТЯ работоспособна. Освобождение i-го накопителя возможно при наличии в нем транзактов, когда ячейка i+1 исправна и свободна.

Все логические условия (занятость накопителей, технологических устройств и состояния ключей) проверяются при помощи блоков GATE.

Для организации повторного обслуживания в случае обнаружения брака используется блок TRANSFER, который позволяет передавать транзакт с определенной вероятностью в другой блок модели.

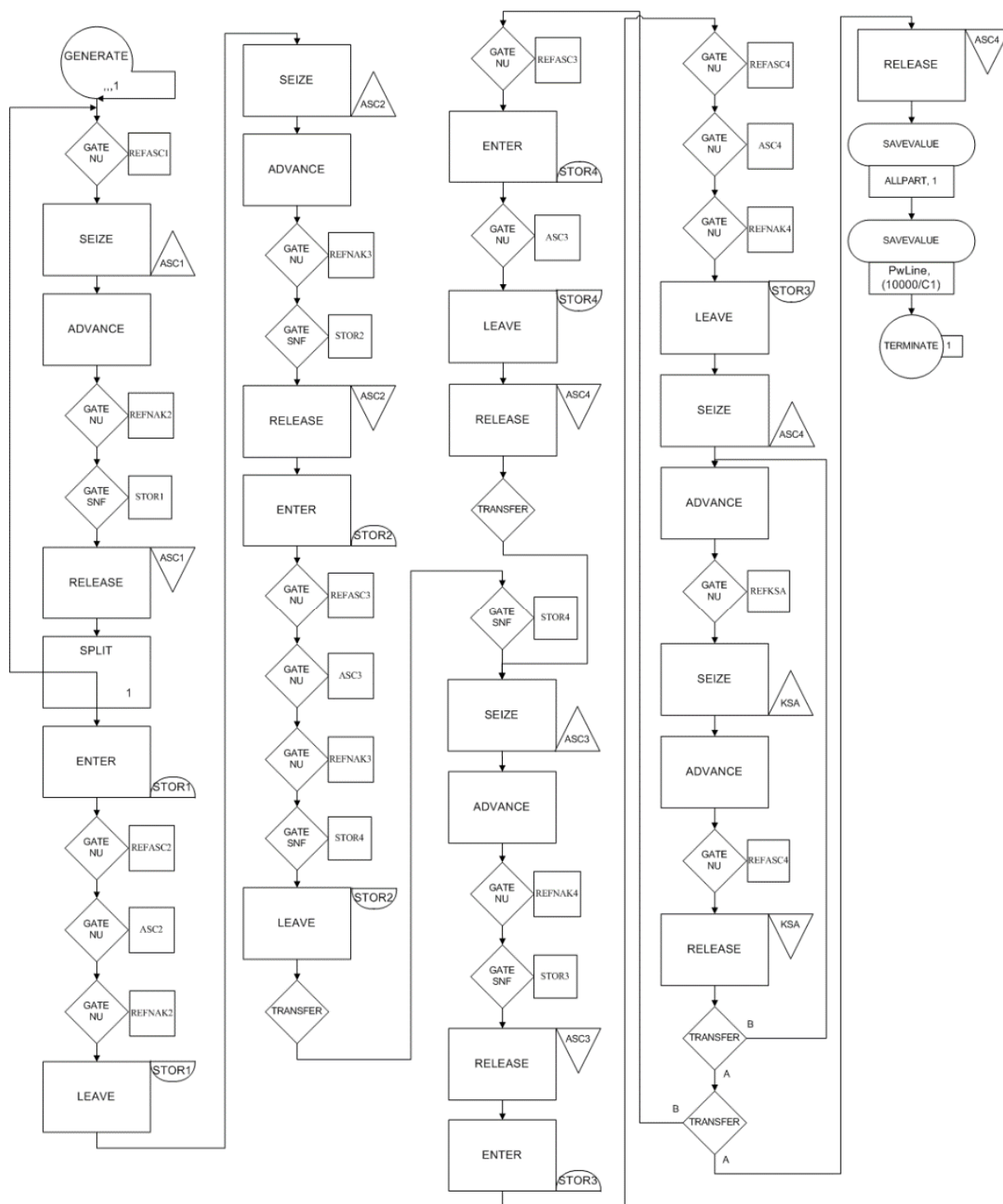


Рис.2 – Блок-схема сегмента 1

В сегментах 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 моделируются потоки отказов технологических ячеек, накопителей и контрольно-сортировочного устройства. Каждому отказу оборудования соответствует в модели транзакт. Устройства, имитирующие отказы всех единиц оборудования, работают параллельно. Транзакт поступает на вход «фиктивного» устройства, имитирующего отказавшее устройство, в соответствии с заданным законом и параметрами генерации (указанный закон соответствует функции распределения времени наработки на отказ соответствующего устройства с требуемыми параметрами). Восстановление оборудования моделируется задержкой транзакта на отрезок времени, длительность которого описывается требуемым законом распределения с заданными параметрами.

Для обеспечения возможности передачи единицы продукции на третью ТЯ, используется «фиктивный» накопитель на одно место, обеспечивающий возможность закончить обработку на этой ТЯ заявки, которая обрабатывается на ней в момент поступления продукции на повторное обслуживание.

Для оценки производительности ГАЛПО проводился многофакторный машинный эксперимент [13]. В качестве факторов принимаются: математическое ожидание времени обслуживания ТЯ (x_1), математическое ожидание времени измерения КСУ (x_2), вероятность получения годных изделий на выходе ТЯ (x_3), среднее время наработки на отказ ТЯ (x_4), среднее время восстановления ТЯ (x_5), среднее время наработки на отказ КСУ (x_6), среднее время восстановления КСУ (x_7).

На выходе модели определялась производительность ГАЛПО $y=f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$. Уровни варьирования факторов выбирались следующие: $\tilde{x}_1 = [3; 5; 8; 10]$ мин. $\tilde{x}_2 = [0,2; 0,5; 1]$ мин. $\tilde{x}_3 = [0,9; 0,95; 0,97]$, $\tilde{x}_4 = [2; 10; 20]$ ч., $\tilde{x}_5 = [1; 0,5; 0,25]$ ч., $\tilde{x}_6 = [20; 10; 2]$ ч., $\tilde{x}_7 = [0,5; 0,2; 0,1]$ ч.

Каждый эксперимент повторялся $n=10$ раз. Для этого в GPSS было задействовано соответствующее количество генераторов случайных чисел. Таким образом каждой точки факторного пространства соответствует 10 значений отклика y .

После проведения машинного эксперимента производилась оценка среднего значения функции отклика по методике, приведенной в [14]. Ввиду громоздкости таблицы полученных результатов в данной статье она не приводится.

Выводы. Проведенный анализ результатов показал, что использование повторного обслуживания в гибких автоматизированных

линиях, имеющих приведенную структуру, позволяет повысить количество годных изделий на выходе в зависимости от предполагаемого брака на 1,6 ... 5,04 %. Следовательно, применение таких систем в производстве позволит повысить их фактическую производительность (т.е. количество годных изделий).

Библиографический список

1. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS: Пер. с англ. / Т.Дж. Шрайбер. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
2. Меткин Н.П. Технологическая подготовка гибких автоматизированных сборочно-монтажных производств в машиностроении / Н.П. Меткин, М.С. Лапин, В.И. Гольц – Л.: Машиностроение. 1986 – 192 с.
3. Копп В.Я. Использование итерационного подхода при построении математических моделей асинхронных автоматизированных линий с обратными связями / В.Я. Копп, А.И. Балакин // Оптимизация производственных процессов. – 2004. – Вып.7. – С. 3-9.
4. Балакин А.И. Анализ функционирования автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание, на основе имитационного моделирования/ А.И. Балакин, В.Я. Копп, Н.А. Балакина // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2018. – № 2 (2). – С. 34-41.
5. Балакин А.И. Имитационное моделирование автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание с исправлением брака на специальных технологических ячейках/ А.И. Балакин, В.Я. Копп, Н.А. Балакина // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2019. – № 4 (8). – С. 72-80.
6. Балакин А.И. Анализ функционирования производственного модуля с возвратом продукции на повторное обслуживание, на основе имитационного моделирования / А.И. Балакин, Н.А. Балакина, Н.А. Волошина // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2021. – № 1(13). – С. 62-70.
7. Балакин А.И. Аналитическое и имитационное моделирование асинхронной автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание / А.И. Балакин, В.Я. Копп, Г.Г. Макухина // Технологические комплексы. – 2011. – Вып. №1(3). – С. 32-36.
8. Балакин А.И. Построение полумарковской модели автоматизированного участка с возвратом продукции /В.Я. Копп, О.В. Филипович, А.М. Кукушкин //Системні технології. – 2009. – Вип. 5(64). – С. 101-111.

9. Копп В.Я. Модель гибкой синхронной линии с рефлекторным управлением и обратными связями / В.Я. Копп, Л.Е. Карташов, А.И. Балакин // Оптимизация производственных процессов. – 2009. – Вып.11. – С. 141-145.
10. Копп В.Я. Построение марковских моделей асинхронных автоматизированных линий с обратными связями / В.Я. Копп, А.И. Балакин, О.В. Филипович, Н.В. Серова // Вестник Тольяттинского государственного университета. – 2004. – Том 3. – С. 166-170.
11. Балакин А.И. Имитационное моделирование асинхронной автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание по результатам измерений / А.И. Балакин, В.Я. Копп, Н.А. Балакина // Наука и Бизнес: пути развития. – 2022. – № 7(133). – С. 31-37.
12. Балакин А. И. Анализ функционирования автоматизированной линии с возвратом продукции на повторное обслуживание по результатам контроля, на основе имитационного моделирования / А.И. Балакин, Н.А. Балакина, Н.Ю. Мирзоян // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2022. – № 1(17). – С. 35-47.
13. Кринецкий И.И. Основы научных исследований: Учебное пособие для вузов / И.И. Кринецкий. – Киев. – Одесса: Вища школа, Головное изд-во, 1981. – 208 с.
14. Митропольский А.К. Статистическое исчисление / А.К. Митропольский. – Ленинград, 1953. – т. 3. – 200 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. SHrajber T.Dzh. Modelirovanie na GPSS: Per. s angl. / T.Dzh. SHrajber. – М.: Mashinostroenie, 1980. – 592 s.
2. Metkin N.P. Tekhnologicheskaya podgotovka gibkih avtomatizirovannyh sborochno-montazhnyh proizvodstv v mashinostroenii / N.P. Metkin, M.S. Lapin, V.I. Gol'c – L.: Mashinostroenie. 1986 – 192 s.
3. Kopp V.YA. Ispol'zovanie iteracionnogo podhoda pri postroenii matematicheskikh modelej asinhronnyh avtomatizirovannyh linij s obratnymi svyazyami / V.YA. Kopp, A.I. Balakin // Optimizaciya proizvodstvennyh processov. – 2004. – Vyp.7. – S. 3-9.
4. Balakin A.I. Analiz funkcionirovaniya avtomatizirovannoj linii s vozvratom produkcii na povtornoje obsluzhivanie, na osnove imitacionnogo modelirovaniya/ A.I. Balakin, V.YA. Kopp, N.A. Balakina // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2018. –№ 2 (2). – S. 34-41.
5. Balakin A.I. Imitacionnoe modelirovanie avtomatizirovannoj linii s vozvratom produkcii na povtornoje obsluzhivanie s ispravleniem braka na

-
- special'nyh tekhnologicheskikh yachejkah/ A.I. Balakin, V.YA. Kopp, N.A. Balakina // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2019. – № 4 (8). – S. 72-80.
6. Balakin A.I. Analiz funkcionirovaniya proizvodstvennogo modulya s vozvratom produkcii na povtornoe obsluzhivanie, na osnove imitacionnogo modelirovaniya / A.I. Balakin, N.A. Balakina, N.A. Voloshina // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2021. – № 1(13). – S. 62-70.
7. Balakin A.I. Analiticheskoe i imitacionnoe modelirovanie asinhronnoj avtomatizirovannoj linii s vozvratom produkcii na povtornoe obsluzhivanie / A.I. Balakin, V.YA. Kopp, G.G. Makuhina // Tekhnologicheskie komplekсы. – 2011. – Vyp. №1(3). – S. 32-36.
8. Balakin A.I. Postroenie polumarkovskoj modeli avtomatizirovannogo uchastka s vozvratom produkcii /V.YA. Kopp, O.V. Filipovich, A.M. Kukushkin //Sistemni tekhnologii. – 2009. – Vip. 5(64). – S. 101-111.
9. Kopp V.YA. Model' gibkoj sinhronnoj linii s reflektornym upravleniem i obratnymi svyazami / V.YA. Kopp, L.E. Kartashov, A.I. Balakin // Optimizaciya proizvodstvennyh processov. – 2009. – Vyp.11. – S. 141-145.
10. Kopp V.YA. Postroenie markovskih modelej asinhronnyh avtomatizirovannyh linii s obratnymi svyazami / V.YA. Kopp, A.I. Balakin, O.V. Filipovich, N.V. Serova // Vestnik Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2004. – Tom 3. – S. 166-170.
11. Balakin A.I. Imitacionnoe modelirovanie asinhronnoj avtomatizirovannoj linii s vozvratom produkcii na povtornoe obsluzhivanie po rezul'tatam izmerenij / A.I. Balakin, V.YA. Kopp, N.A. Balakina // Nauka i Biznes: puti razvitiya. – 2022. – № 7(133). – S. 31-37.
12. Balakin A. I. Analiz funkcionirovaniya avtomatizirovannoj linii s vozvratom produkcii na povtornoe obsluzhivanie po rezul'tatam kontrolya, na osnove imitacionnogo modelirovaniya / A.I. Balakin, N.A. Balakina, N.YU. Mirzoyan // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2022. – № 1(17). – S. 35-47.
13. Krineckij I.I. Osnovy nauchnyh issledovanij: Uchebnoe posobie dlya vuzov / I.I. Krineckij. – Kiev. – Odessa: Vishcha shkola, Golovnoe izd-vo, 1981. – 208 s.
14. Mitropol'skij A.K. Statisticheskoe ischislenie / A.K. Mitropol'skij. – Leningrad, 1953. – t. 3. – 200 s.

¹Балакин Игорь Алексеевич, студент, ibalakin72@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель, NABalakina@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

SIMULATION MODEL OF A FLEXIBLE AUTOMATED LINE WITH REPEATED MAINTENANCE BASED ON INSPECTION RESULTS

I.A. Balakin, N.A. Balakina

The structure of a flexible automated line with repeated maintenance is considered and its simulation model is proposed. The program listing in the GPSS language and the block diagram of its main segment are given. The analysis of the results of the simulation, which showed the possibility of increasing the productivity of flexible automated line when using repetitive maintenance.

Keywords: flexible production, automated line, simulation modeling, repetitive maintenance, productivity.

Balakin Igor Alexeyevich, student, ibalakin72@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Balakina Natalia Anatolievna, senior lecturer, NABalakina@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАСТРОЙКИ ЭЛЕМЕНТОВ ПНЕВМОПОДВЕСКИ НА КОЛЕБАНИЯ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Мурашковский И.А.¹, Вожжов А.А.²

Аннотация. Для улучшения качества и стабильной работы пневматических систем поддрессоривания, обеспечивающих эффективную виброзащиту автотранспортных средств, анализа влияния воздушного демпфирования и различных сочетаний переменного и постоянного объема пневматической рессоры на ее демпфирующие свойства предлагается использовать исследования на основе разработанной расчётной динамической модели; полученные с помощью данной методики значения амплитуд колебаний, дают возможность прогнозировать уровень колебаний при движении. Допустимость и эффективность такого подхода подтверждается экспериментально.

Ключевые слова. Пневматическое поддрессоривание, дорожные условия, демпфирующие свойства, амплитуды колебаний, контроль уровня кузова, прогнозирование.

Постановка проблемы. Обширная практическая база и теория к настоящему моменту позволяет однозначно утверждать, что пневматические пружины обеспечивают намного более высокий уровень комфорта, чем любые варианты обычных неактивных подвесок. За счет работы дросселирующей системы пневмобаллон гасит часть колебаний, выступая, таким образом, амортизатором. Типичная упругая характеристика пневмопружины сильно отличается от простой механической системы: так, на частотных характеристиках подвески с пневматикой почти не сказывается рост неподрессоренных масс, а высокочастотные вибрации через пневматику не передаются вовсе. Не исключается обратная связь и жесткий контроль уровня кузова, что улучшает работу подвески и возможность изменения дорожного просвета.

Разрабатываемая система динамической подвески представляет собой пневматическую подвеску, в которой используется четыре упругих пневматических элемента вместо обычных амортизаторов и спиральных пружин. Пневматическая подвеска устанавливается на автомобиле.

Повышением виброзащитных свойств подвески колес автотранспортных средств за счет применения воздушного демпфирования

и изменения внутренней структуры пневматических рессор занимают многие исследователи [1-5].

В работах [1,5,6] приводятся результаты стендовых испытаний и теоретических исследований пневмоподвески.

В настоящее время в пневматических подвесках автотранспортных средств для гашения колебаний кузова и колес в основном применяют нерегулируемые гидравлические амортизаторы, которые имеют невысокое сопротивление и не обеспечивают достаточную плавность хода при движении по сильно изношенным и разбитым дорогам, а также по пересеченной местности. Повышение сопротивления амортизатора уменьшает резонансные колебания кузова и колес, однако, существенно усиливает колебания поддрессоренных и неподдрессоренных масс в межрезонансной и зарезонансной зонах, что снижает плавность хода и требует снижения скорости движения. При этом влияние изменения характеристик элементов сомой пневмоподвески остается недостаточно изучено.

Цель исследования поиск новых более простых технических решений пневматического поддрессоривания, обеспечивающих эффективную виброзащиту автотранспортных средств в широком диапазоне частот, их экспериментальное исследование являются актуальной задачей.

Изложение основного материала. Анализ влияния воздушного демпфирования и различных сочетаний переменного и постоянного объема пневматической рессоры на ее демпфирующие свойства могут быть исследованы на основе разработанной расчётной динамической модели, **Рис.1**.

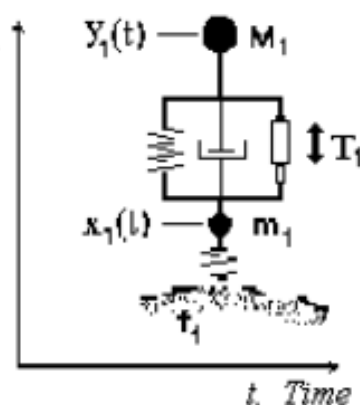


Рис.1 – Динамическая модель двухмассовой системы

Дифференциальные уравнения, описывающие движение системы, составлены на основании принципа Даламбера:

$$\begin{cases} M \ddot{y} + m \ddot{x} = c_t(t)(f(t) - x) \\ M \ddot{y} + c(t)(y - x) + \alpha(t)(\dot{y} - \dot{x}) = T(t) \end{cases}, \quad (1)$$

где

$f(t)$ – воздействие профиля дороги,

$T(t)$ – управляющее воздействие со стороны актуатора,

$c_t(t)$ – упругость шины,

$c_l(t)$ – упругость пружины,

$\alpha(t)$ – коэффициент поглощения амортизатора,

$x(t)$ – координата подвески,

$y(t)$ – координата подрессоренной массы (корпус автомобиля),

M_l – подрессоренная масса,

m_l – неподрессоренная масса.

Эта система записывается в следующей форме:

$$\begin{cases} \ddot{y} = \frac{1}{M} \left[T(t) - c_t(t)(y - x) - \alpha(t)(\dot{y} - \dot{x}) \right] \\ \ddot{x} = \frac{1}{m} \left[c_t(t)(y - x) + \alpha(t)(\dot{y} - \dot{x}) - T(t) + c_l(t)(f(t) - x) \right] \end{cases}, \quad (2)$$

или в форме Коши

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{\Phi(t)}{M} \\ \dot{x}_3 = \dot{x}_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{\Phi(t)}{m} + c(f(t) - x_3) \end{cases}$$

где $y = x_1; \dot{y} = x_2; x = x_3; \dot{x} = x_4; \Phi(t)(y - x) + \alpha(t)(\dot{y} - \dot{x}) - T(t); c = \frac{c_t}{m} y = x_1;$

Система (2) решена методом Рунге-Кутты 4-го порядка с заданными начальными условиями. Величины $c_l(t)$, $\alpha(t)$, и $c_t(t)$ полагаются константами.

Величины $x(t)$, $y(t)$, полученные в результате интегрирования дифференциального уравнения, используются в программе в качестве входных данных от сенсоров.

При определении констант с использованием *fsolve* (Maple) приняты исходные данные: $P = 100\text{Н}$; $C_0 = 1140 \cdot 10^3\text{Н/м}$; $C_D = 640 \cdot 10^3\text{Н/м}$; $C_H = 5000 \cdot 10^3\text{Н/м}$; $M_I = 120\text{ кг}$; $m_I = 20\text{ кг}$; $f_I = 2492\text{ с}^{-1}$; $f_2 = 3595\text{ с}^{-1}$; $v_{21} = 2,118$; $v_{22} = -1,416$; $f_{III} = 209,44\text{ с}^{-1}$; $B_I = -0,103 \cdot 10^{-5}\text{м}$; $B_2 = -0,109 \cdot 10^{-4}\text{м}$.

Решение: $A_I = 2,95 \cdot 10^{-4}\text{мм}$; $D_I = 1,44 \cdot 10^{-4}\text{мм}$; $\alpha_I = 6,2818$; $\alpha_2 = -5,424$.

Графики колебаний кузова изображены на **Рис.2**.

Амплитуда колебаний кузова на порядок меньше амплитуды колебаний деталей подвески. Это позволяет, в первом приближении, исследовать колебания только деталей подвески как систему с одной степенью свободы. За счет варьирования режимов движения и исходных параметров представляется возможность уменьшать амплитуду колебаний.

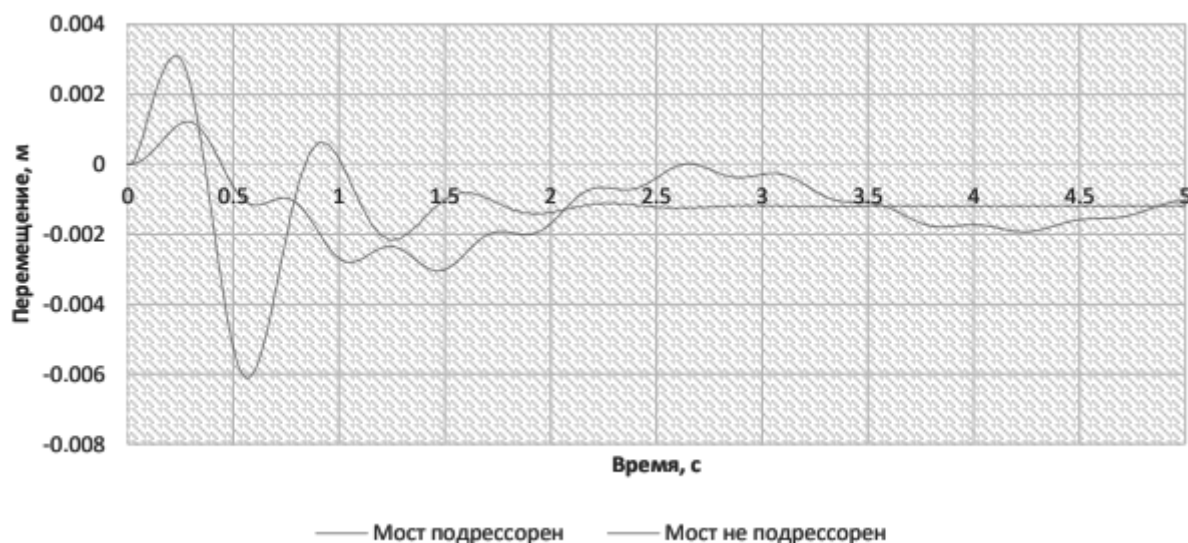


Рис.2 – Сравнительная оценка виброперемещений систем поддрессоривания кузова при поддрессоренном и не поддрессоренном мостах

Выводы. Применяемая методика позволит управлять уровнем колебаний путем изменения условий движения и настройки подвески. Кроме того, зная расчетные значения амплитуд колебаний, полученные с

помощью данной методики, предоставляет возможность прогнозировать уровень колебаний при движении транспортного средства, что является темой дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Фитилев Б.Н. Гидропневматическая подвеска и ее упругодемпфирующие характеристики / Б.Н. Фитилев, В.А. Комочков, В.М. Труханов, И.В. Соболевский // Справочник. Инженерный журнал. – 2007. – № 11. – С. 62–64.
2. Новиков В.В. Пневморессора с регулируемым по амплитуде и направлению воздушным демпфером / В.В. Новиков, А.С. Дьяков, В.А. Федоров // Автомобильная промышленность. – 2007. – №10. – С. 21-22.
3. Хамитов Р.Н. Синтез системы управления импульсным электродинамическим клапаном пневмоамортизатора / Р.Н. Хамитов // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – №2(131). – С. 62-65.
4. Калашников Б.А. Системы амортизации объектов с дискретной коммутацией упругих элементов / Б.А. Калашников. – Омск: ОмГТУ, 2008. – 344 с.
5. Чернышов К.В. Определение условий оптимального регулирования жесткости пневматической подвески АТС / К.В. Чернышов, А.В. Поздеев, В.В. Новиков, И.М. Рябов // Грузовик. – 2010. – №11. – С. 2-5.
6. Зубарев А.В. Некоторые актуальные проблемы расчетов пневматических упругих элементов машин / А.В. Зубарев, Е.В. Климентьев, А.О. Звонов // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: матер. XXIV Всерос. конф. (г. Омск, 02–04 июня 2015 г.). Омск. – 2015. – С. 52-56.

Bibliograficheskiy spisok

1. Fitilev B.N. Hidropnevmaticheskaya podveska i ee uprugodempfiruyushchie harakteristiki / B.N. Fitilev, V.A. Komochkov, V.M. Truhanov, I.V. Sobolevskij // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – 2007. – № 11. – S. 62–64.
2. Novikov V.V. Pnevmoressora s reguliruemym po amplitude i napravleniyu vozdushnym dempferom / V.V. Novikov, A.S. D'yakov, V.A. Fedorov // Avtomobil'naya promyshlennost'. – 2007. – №10. – С. 21-22.
3. Hamitov R.N. Sintez sistemy upravleniya impul'snym elektrodinamicheskim klapanom pnevmoamortizatora / R.N. Hamitov // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – 2008. – №2(131). – S. 62-65.
4. Kalashnikov B.A. Sistemy amortizacii ob"ektov s diskretnoj kommutaciej uprugih elementov / B.A. Kalashnikov. – Omsk: OmGTU, 2008. – 344 s.

-
5. CHernyshov K.V. Opredelenie uslovij optimal'nogo regulirovaniya zhestkosti pnevmaticheskoy podveski ATS / K.V. CHernyshov, A.V. Pozdeev, V.V. Novikov, I.M. Ryabov // Gruzovik. – 2010. – №11. – S. 2-5.
 6. Zubarev A.V. Nekotorye aktual'nye problemy raschetov pnevmaticheskikh uprugih elementov mashin / A.V. Zubarev, E.V. Kliment'ev, A.O. Zvonov // CHislennye metody resheniya zadach teorii uprugosti i plastichnosti: mater. XXIV Vseros. konf. (g. Omsk, 02–04 iyunya 2015 g.). Omsk. – 2015. – S. 52-56.

Мурашковский Илья Александрович, студент, ilyich01@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

Вожжов Андрей Анатольевич, к.т.н., доцент, AAVozhzhov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE AIR SUSPENSION ELEMENTS SETTINGS ON THE SPRING AND UNSPRESSED MASS VIBRATIONS

I.A. Murashkovskiy, A.A. Vozhzhov

To search for new, simpler technical solutions for air suspension that provide effective vibration protection for vehicles, to analyze the effect of air damping and various combinations of variable and constant volume of the air spring on its damping properties, it is proposed to use studies based on the developed computational dynamic model, the values obtained using this technique oscillation amplitudes, make it possible to predict the level of oscillations during movement. The admissibility and effectiveness of this approach is confirmed experimentally.

Keywords: pneumatic suspension, road conditions, damping properties, oscillation amplitudes, body level control, forecasting.

Murashkovskiy Ilia Alexsandrovich, student, ilyich01@mail.ru, Russia, Sevastopol State University

Vozhzhov A.A., candidate of technical sciences, docent AAVozhzhov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ДВУХ ЭЛЕМЕНТОВ С МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛЬЮ «ВХОД-ВЫХОД» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППРОКСИМАЦИИ

Филипович О.В.¹, Филипович В.О.²

Аннотация. Рассматривается процесс однопараметрической селективной сборки двух элементов для случая использования мультипликативной модели «вход-выход». Приведены основные зависимости, связывающие предельные значения, отклонения и допуски входных и выходных параметров. Предложено линеаризовать исходную модель с использованием рядов Тейлора. Для линеаризованной модели определены допуски и границы селективных групп, а также основные показатели сборочного процесса. Приведен пример моделирования.

Ключевые слова. Математическая модель, селективная сборка, аппроксимация, ряд Тейлора.

Постановка задачи.

Классическая задача, рассматриваемая отечественными и зарубежными исследователями [1-12], состоит в анализе показателей сборочного процесса изделий, содержащих два и более элемента с линейными моделями «вход-выход». Особый интерес представляет применение селективных методов для комплектования элементов при наличии нелинейных зависимостей между параметрами элементов сборочных комплектов и выходным параметром изделия. В данной работе предлагается рассмотреть процесс селективной сборки двух элементов с выходным параметром, представляемым в виде произведения входных

$$y = x_1 \cdot x_2. \quad (1)$$

Предположим, что каждый из параметров x_i ($i = \overline{1,2}$) имеет отклонения относительно номинального значения, обусловленные несовершенством технологического процесса изготовления элементов. Величины предельных отклонений определяются расширенным допуском на соответствующий параметр Tx_i . Исходными данными для решения такой задачи служат также номинальные значения параметров элементов (y_n, x_{1n}, x_{2n}), величина допуска на выходной параметр Ty и отклонения этой величины:

- Eiy – нижнее предельное отклонение;
- Esy – верхнее предельное отклонение.

Выражения для определения предельных значений параметров элементов имеют вид

$$x_{1\min}x_{2\min} \geq y_{\min}, \quad (2)$$

$$x_{1\max}x_{2\max} \leq y_{\max}, \quad (3)$$

отсюда предельные отклонения и величины допусков равны

$$Eix_1Eix_2 + x_1Eix_2 + x_2Eix_1 \geq Eiy; \quad (4)$$

$$Esx_1Esx_2 + x_1Esx_2 + x_2Esx_1 \leq E sy; \quad (5)$$

$$Ty \geq x_1Tx_2 + x_2Tx_1. \quad (6)$$

Селективная сборка и метод групповой взаимозаменяемости применяется в случае, когда невозможно обеспечить выполнение условия (6). Тогда Tx_i увеличивают до определенных значений и разбивают на интервалы, а само выражение будет иметь вид:

$$Ty \geq x_1Tx_2^{(k_2)} + x_2Tx_1^{(k_1)}. \quad (7)$$

Неравенства (2) - (7) определяют требования к точности входных и выходного параметров и служат исходными данными для определения величин допусков и границ селективных групп.

Допуск на выходной параметр зависит от его номинального значения и принятой степени точности. Если речь идет о прецизионных изделиях, то отношение $\frac{Ty}{y}$ достаточно мало. Соответственно, для обеспечения заданной точности необходимо, чтобы отношения

$$\frac{Tx_i^{(k_i)}}{x_i} = \alpha_i \quad (8)$$

имели очень малый порядок. В этом случае, практически без потери точности, исходную зависимость (1) можно линеаризовать различными способами.

Целью работы является решение задачи селективной сборки двух элементов с мультипликативной моделью «вход-выход» с использованием аппроксимирующей зависимости в виде ряда Тейлора.

Математическая модель.

Ряд Тейлора в точке x_0 функции $y(x)$ вещественной переменной x , бесконечно дифференцируемой в окрестности точки x_0 :

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n. \quad (9)$$

В данном случае имеем функцию двух переменных, для которой разложение в ряд Тейлора имеет вид

$$y(x_1, x_2) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{T^n y(x_{10}, x_{20})}{n!}, \quad (10)$$

где $T = (x_1 - x_{10}) \frac{\partial}{\partial x_1} + (x_2 - x_{20}) \frac{\partial}{\partial x_2}$ – дифференциальный оператор.

Для линеаризации функции (1) возьмем два первых члена ряда (10):

$$y(x_1, x_2) = x_{10}x_{20} + x_{20}(x_1 - x_{10}) + x_{10}(x_2 - x_{20}) + R_1(x_1, x_2), \quad (11)$$

где $R_1(x_1, x_2)$ – остаточный член, в данном случае равный $(x_1 - x_{10})(x_2 - x_{20})$.

Пренебрегая остаточным членом и проведя преобразования, получим

$$y(x_1, x_2) = \xi_0 + \xi_1 x_1 + \xi_2 x_2, \quad (12)$$

где $\xi_0 = -x_{10}x_{20}$, $\xi_1 = x_{20}$, $\xi_2 = x_{10}$. Для функции, записанной в виде (12), выражения (4), (5) и (7) будут иметь вид

$$\xi_1 Eix_1 + \xi_2 Eix_2 \geq Eiy; \quad (13)$$

$$\xi_1 Esx_1 + \xi_2 Esx_2 \leq E sy; \quad (14)$$

$$Ty \geq \xi_1 Tx_1^{(k_1)} + \xi_2 Tx_2^{(k_2)}. \quad (15)$$

Для определения величин групповых допусков предлагается использование способа назначения допусков одинаковой относительной точности. Предположим, что допуск каждого из параметров с его номинальным значением связывает коэффициент, определяемый по формуле (8). Предполагая, что эти коэффициенты равны $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_m$, из

(15) получаем $\alpha_m \leq \frac{Ty}{\xi_1 x_1 + \xi_2 x_2}$. Отсюда

$$Tx_i^{(k_i)} = \alpha_m x_i. \quad (16)$$

Этот способ универсален, т.к. при назначении допусков позволяет учесть величины номинальных значений параметров сопрягаемых элементов.

Предположим, что координаты середин интервалов допусков совпадают с номинальными значениями параметров каждого элемента, а отклонения симметричны и равны $\pm Tx_i / 2$. Примем, что количество групп сортировки является одинаковым для элементов обоих типов ($l_1 = l_2 = l$) и нечетным. Пронумеруем группы таким образом, чтобы нулевые значения параметров совпадали с серединами нулевых групп (**Рис.1**). Номера групп положительны при $x_i > 0$ и отрицательны при $x_i < 0$.

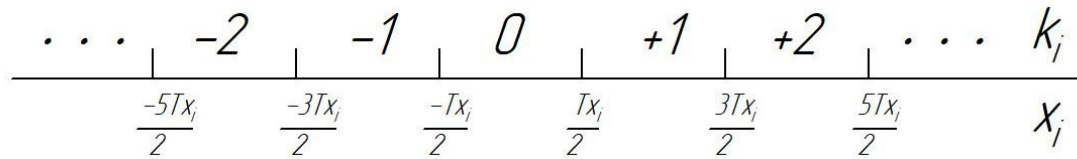


Рис.1 – Схема расположения и нумерация интервалов групповых допусков

Уравнение комплектования, записанное в номерах селективных групп, имеет вид:

$$\sum_{i=1}^2 k_i = k_1 + k_2 = 0, \quad (17)$$

при этом комплектование считается одновариантным.

Групповые допуски каждой селективной группы $Tx_i^{(k_i)}$ ($i = \overline{1,2}$) равны между собой вследствие линейности модели «вход-выход». Границы групп $a_i^{(k_i)}$ легко определяются, зная отклонения нулевой группы:

$$Esx_i^0 = +\frac{Tx_i^{(k_i)}}{2}; \quad Eix_i^0 = -\frac{Tx_i^{(k_i)}}{2}, \quad (i = \overline{1,2}). \quad (18)$$

Зная $a_i^{(k_i)}$ и используя уравнение (17), можно определить показатели сборочного процесса:

– вероятность получения сборочного комплекта типа $(k_1; k_2)$

$$I^{(k_1; k_2)} = \min_{i=1,2} \{I_i^{(k_i)}\}, \quad I_i^{(k_i)} = \int_{Tx_i^{(k_i)}} f_{li}(x_i) dx_i; \quad (19)$$

– вероятность получения годных сборочных комплектов:

$$I = \sum I^{(k_1; k_2)}, \quad (20)$$

где $f_{li}(x_i)$ – закон распределения случайной величины x_i ($i = \overline{1,2}$).

Принимая во внимание, что наибольшее отклонение каждой из величин от номинальных значений равно $x_{in} \pm Tx_i / 2$, можно записать

$$R_1(x_1, x_2) = \frac{Tx_1 Tx_2}{4} = \frac{\alpha_0^2 x_{1n} x_{2n}}{4}, \quad (21)$$

где α_0 – относительная точность, одинаково заданная для параметров элементов обоих типов, $\alpha_0 = \frac{Tx_i}{x_i}$. Выражение (21) определяет погрешность аппроксимации на заданном интервале.

Пример моделирования.

Будем считать, что распределения значений x_i – гауссовские, имеющие параметры m_{x_i} и σ_{x_i} (математические ожидания и среднеквадратические отклонения случайных величин x_i). Все значения приведены в условных единицах.

Исходные данные.

1. Номинальные значения параметров $x_1 = 10000$; $x_2 = 0,1$.
2. Выходной параметр изделия $y = x_1 x_2 = 1000 \pm 2,5$.
3. Величины расширенных допусков $Tx_1 = 200$; $Tx_2 = 0,002$ ($\alpha_0 = 0,02$).
4. Математические ожидания: $m_{x_1} = 0$; $m_{x_2} = 0$; среднеквадратические отклонения: $\sigma_{x_1} = 33,333$; $\sigma_{x_2} = 0,00036$.

Величины допусков, определяемые по формуле (16), равны:

$$Tx_1^{(k_1)} = 25, Tx_2^{(k_2)} = 0,00025.$$

Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Номер группы	-3	-2	-1	0	1	2	3
границы групп, элемент 1	-87,5 -62,5	-62,5 -37,5	-37,5 -12,5	-12,5 12,5	12,5 37,5	37,5 62,5	62,5 87,5
границы групп, элемент 2	-0,00088 -0,00063	-0,00063 -0,00038	-0,00038 -0,00013	-0,00013 0,000125	0,00013 0,00038	0,00038 0,00063	0,00063 0,00088
$I_1^{(k_1)}$	0,026064	0,099898	0,223536	0,29234	0,223536	0,099898	0,026064
$I_2^{(k_2)}$	0,034771	0,108382	0,214305	0,268966	0,214305	0,108382	0,034771
$I_{СК}$	0,9495						

График зависимости остаточного члена разложения в ряд Тейлора $R_1(x_1, x_2)$ от относительной точности α_0 при заданных номинальных значениях параметров показан на **Рис.2**.

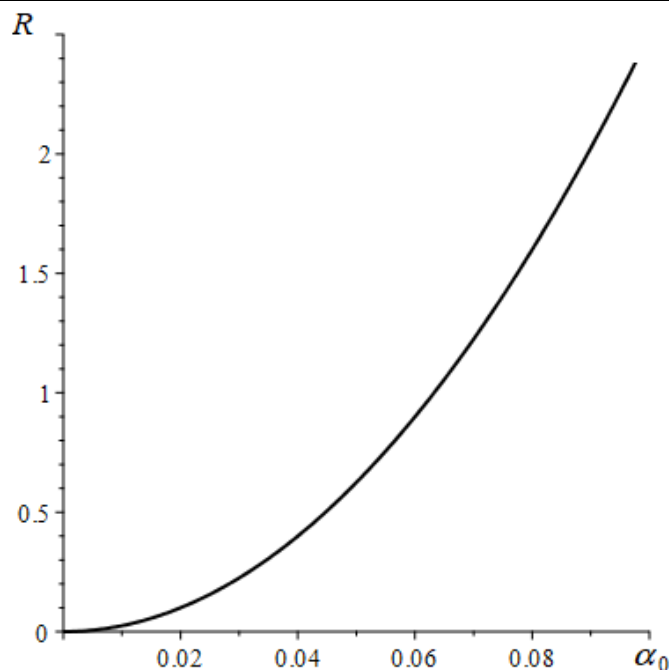


Рис.2 – График зависимости $R_1(x_1, x_2)$ от α_0

Выводы. Из графика видно, что для заданного в примере допуска на выходной параметр $T_y=5$, предлагаемый вид аппроксимирующей зависимости можно применять при $\alpha_0 \leq 0,05$ с точностью, достаточной для инженерных расчетов. Перспективой дальнейших исследований является сравнение результатов, полученных с использованием аналитических и имитационных моделей.

Библиографический список

1. Бонч-Осмоловский М.А. Селективная сборка / М.А. Бонч-Осмоловский. – М.: Машиностроение, 1974. – 144с.
2. Буловский П.И. Автоматизация селективной сборки приборов / П.И. Буловский, Г.В. Крылов, В.А. Лопухин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 232с.
3. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки / В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
4. Филипович О.В. Управление параметрами селективной сборки двух деталей / О.В. Филипович, Г.В. Невар, М.И. Гарматюк и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып.10. – С. 144-150.
5. Филипович О.В. Разработка структуры информационно-управляющей системы металлорежущего станка при наличии послеоперационного

-
- контроля / О.В. Филипович // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – №4-2 (324). – С. 134-140.
6. Филипович О.В. Оценка влияния погрешности измерения на показатели селективной сборки с помощью имитационного моделирования / О.В. Филипович, Г.В. Невар // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. – С. 428-437.
7. Филипович О.В. Модель процесса однопараметрической селективной сборки сложных изделий / О.В. Филипович, А.Г. Карлов, Н.А. Волошина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 398-403.
8. Филипович О.В. Имитационная модель селективной сборки трех элементов с сортировкой по оцениваемым значениям / О.В. Филипович // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2022. – № 1. – С. 14-17.
9. Сорокин М.Н. Математическая постановка задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" / М.Н. Сорокин, И.И. Колтунов, Д.А. Сазонов, Д.И. Урманова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 3. – С. 40-43.
10. Сорокин М.Н. Метод перераспределения потока для решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" / М.Н. Сорокин, И.И. Колтунов, Д.А. Сазонов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 9. – С. 7-13.
11. Набатников Ю.Ф. Снижение незавершенного производства при селективной сборке / Ю.Ф. Набатников // Технология машиностроения. – 2009. – №11. – С.23-25.
12. Малахов А.Д. Организация селективной сборки при неравенстве групповых допусков / А.Д. Малахов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – №5. – С. 11-13.

Bibliograficheskiy spisok

1. Bonch-Osmolovskij M.A. Selektivnaya sborka / M.A. Bonch-Osmolovskij. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 144s.
2. Bulovskij P.I. Avtomatizaciya selektivnoj sborki priborov / P.I. Bulovskij, G.V. Krylov, V.A. Lopuhin. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1978. – 232s.
3. Katkovnik V.YA. Osnovy teorii selektivnoj sborki / V.YA. Katkovnik, A.I. Savchenko. – L.: Politehnika, 1991. – 303 s.
4. Filipovich O.V. Upravlenie parametrami selektivnoj sborki dvuh detalej / O.V. Filipovich, G.V. Nevar, M.I. Garmatyuk i dr. // Izvestiya TulGU.

- Tekhnicheskie nauki. – 2015. – Vyp.10. – S. 144-150.
5. Filipovich O.V. Razrabotka struktury informacionno-upravlyayushchej sistemy metallovezhushchego stanka pri nalichii posleoperacionnogo kontrolya / O.V. Filipovich // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2017. – №4-2 (324). – S. 134-140.
 6. Filipovich O.V. Ocenka vliyaniya pogreshnosti izmereniya na pokazateli selektivnoj sborki s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya / O.V. Filipovich, G.V. Nevar // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2017. – № 9-1. – S. 428-437.
 7. Filipovich O.V. Model' processa odnoparametricheskoj selektivnoj sborki slozhnyh izdelij / O.V. Filipovich, A.G. Karlov, N.A. Voloshina // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2021. – № 5. – S. 398-403.
 8. Filipovich O.V. Imitacionnaya model' selektivnoj sborki trekh elementov s sortirovkoj po ocenivaemym znacheniyam / O.V. Filipovich // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – 2022. – № 1. – S. 14-17.
 9. Sorokin M.N. Matematicheskaya postanovka zadachi komplektovaniya pri selektivnoj sborke izdelij tipa "podshipnik" / M.N. Sorokin, I.I. Koltunov, D.A. Sazonov, D.I. Urmanova // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – 2014. – № 3. – S. 40-43.
 10. Sorokin M.N. Metod pereraspredeleniya potoka dlya resheniya zadachi komplektovaniya pri selektivnoj sborke izdelij tipa "podshipnik" / M.N. Sorokin, I.I. Koltunov, D.A. Sazonov // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – 2015. – № 9. – S. 7-13.
 11. Nabatnikov YU.F. Snizhenie nezavershennogo proizvodstva pri selektivnoj sborke / YU.F. Nabatnikov // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 2009. – №11. – S.23-25.
 12. Malahov A.D. Organizaciya selektivnoj sborki pri neravenstve gruppovyh dopuskov / A.D. Malahov // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – 2005. – №5. – S. 11-13.

¹*Филипович Олег Викторович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой, ophis1@yandex.ru, Россия, Севастопольский государственный университет*

²*Филипович Вадим Олегович, студент, ophis1@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

*SOLVING THE PROBLEM OF SELECTIVE ASSEMBLY OF TWO ELEMENTS
WITH A MULTIPLICATIVE INPUT-OUTPUT MODEL USING
APPROXIMATION*

O.V. Filipovich, V.O. Filipovich

The process of one-parameter selective assembly of two elements for the case of using a multiplicative "input-output" model is considered. The main dependences connecting limit values, deviations and tolerances of input and output parameters are given. It is proposed to linearize the original model using Taylor series. For the linearized model, the tolerances and boundaries of the selective groups, as well as the main indicators of the assembly process, are determined. An example of modeling is given.

Keywords: mathematical model, selective assembly, approximation, Taylor series.

Filipovich Oleg Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, Head of the Department, ophisl@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

Filipovich Vadim Olegovich, student, ophisl@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ В ANYLOGIC СТРУКТУРЫ «НАКОПИТЕЛЬ – ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА – НАКОПИТЕЛЬ»

Заморёнов М.В.¹, Мирзоян Н.Ю.², Заморёнов И.М.³

***Аннотация:** В данной работе проводится верификация аналитической модели сопряженного участка, построенной с использованием метода траекторий, путем сравнения ее результатов моделирования с результатами имитационного моделирования. Разрабатывается имитационная модель в AnyLogic. С помощью имитационной модели определяются коэффициенты готовности работы сопряженного участка на выдачу продукции и на ее прием. Сравниваются указанные коэффициенты готовности безотказной работы сопряженного участка, полученные с помощью имитационной и аналитической моделей. Проводится расчет относительной погрешности результатов.*

***Ключевые слова:** имитационная модель, верификация, относительная погрешность, сопряженный участок*

Введение.

Все большее значение в современной технике приобретает временное резервирование систем. Технология временного резервирования основана на том, что в системе имеется несколько компонентов, каждый из которых может выполнять одну и ту же задачу. При отказе одного из компонентов его функции мгновенно перехватывает другой компонент. При этом переключение может происходить автоматически или с помощью оператора.

Временное резервирование позволяет быстро и надежно восстанавливать работу системы после ее отказа, а также снижать вероятность сбоев в ее работе. Это особенно важно для систем, работающих в режиме 24/7, например, для биржевых торговых систем, систем бронирования авиабилетов и отелей, сервисов облаков и т.д. Также временное резервирование снижает риски различных производственных аварий, что ведет к экономии времени и средств на восстановление и повторную настройку оборудования.

В целом, технология временного резервирования эффективна и экономически выгодна для обеспечения надежности работы систем в современных условиях.

При моделировании сложных систем с временным резервированием возникают ситуации, когда необходимо использовать модель участка, состоящего из технологической ячейки и пристыкованных к ней входного и выходного накопителей, так называемого сопряженного участка. Входной накопитель при отказе технологической ячейки позволяет функционировать какое-то время ячейкам, стоящим до него, а выходной – после него. Аналитическая модель такой структуры известна из литературы [1, 2].

Функционирование данного участка характеризуется тремя основными параметрами:

- функцией распределения времени наработки на отказ, при условии одновременного приема и выдачи продукции данным участком;
- функцией распределения времени наработки на отказ, при условии только приема продукции данным участком;
- функцией распределения времени наработки на отказ, при условии только выдачи продукции данным участком.

Для моделирования процесса функционирования указанной структуры используется аппарат теории полумарковских процессов [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Постановка задачи

В [1, 2] приведена модель структуры, содержащую «входной накопитель - обслуживающее устройство-выходной накопитель». Такая структура названа полным сопряженным участком (**Рис.1**). Приведенная модель позволяет определять указанные времена.

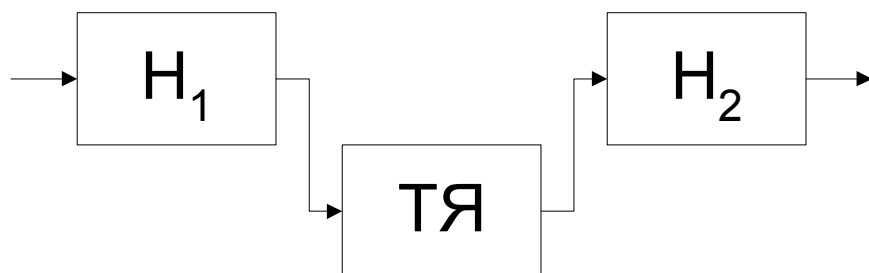


Рис.1 – Структура полного сопряженного участка (ветви)

Граф состояний указанной структуры представлен на **Рис.2**.

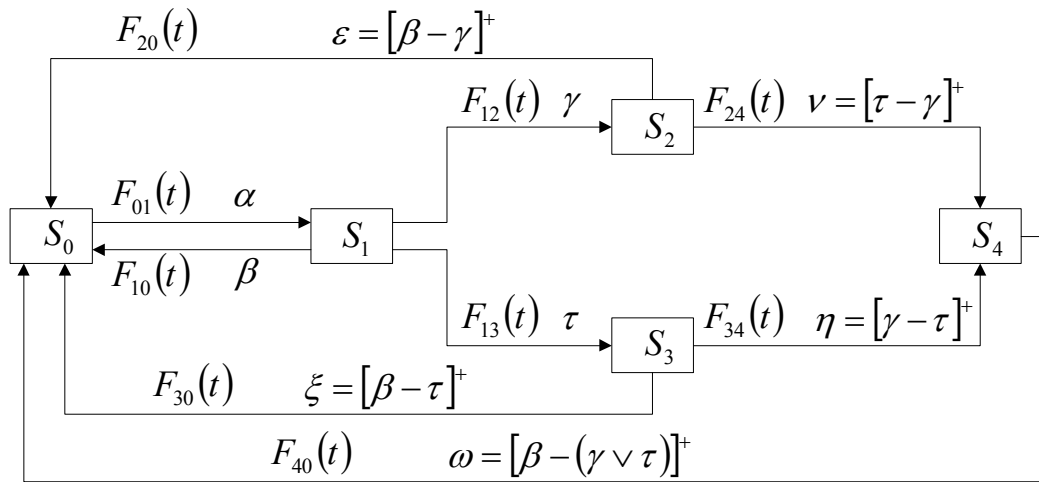


Рис.2 – Граф состояний полного сопряженного участка

Состояния на графе:

S_0 - технологическая ячейка исправна;

S_1 - ТЯ отказала, резервы времени в H_1 случайная величина γ , а в H_2 - СВ τ ($\gamma \neq 0; \tau \neq 0$);

S_2 - ТЯ отказала, резерв γ в H_1 исчерпан, а в H_2 резерв есть ($\tau > \gamma$) и является СВ $[\tau - \gamma]^+$;

S_3 - ТЯ отказала, резерв τ в H_2 исчерпан, а в H_1 резерв есть ($\gamma > \tau$) и является СВ $[\gamma - \tau]^+$;

S_4 - ТЯ отказала, в H_1 и в H_2 резервы времени исчерпаны ($\gamma = 0; \tau = 0$);

ФР времени, когда сопряженный участок может и принимать и выдавать продукцию, либо только принимать:

$$F_{013}(t) = F_0^\theta(t) * F_1^\theta(t) * F_3(t),$$

ФР времени безотказной работы на выдачу продукции:

$$F_{012}(t) = F_0^\theta(t) * F_1^\theta(t) * F_2(t),$$

$$\text{где } F_0^\theta(s) = \frac{F_0(s)}{c_0 - (c_0 - 1)f_0(s)}; \quad F_1^\theta(s) = \frac{F_1(s)}{c_1 - (c_1 - 1)f_1(s)},$$

$$c_0 = \frac{m_0^\theta}{m_0}, \quad c_1 = \frac{m_1^\theta}{m_1}, \quad m_i^\theta = m_i \cdot \frac{\rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_e},$$

* – знак операции свертки

$E \subset M_+$ подмножество состояний $S_e \in E$ множества M_+ из которых возможен прямой переход во множество M_- ,

ρ_i – удельные частоты попадания в каждое из состояний $S_i \in M$,

P_{ij} – вероятности переходов из состояний $S_i \in M$ в состояния $S_j \in M$.

Целью данной работы является верификация аналитической модели [2]. В данном случае инструментом верификации было выбрано сравнение результатов аналитического моделирования и имитационного моделирования [13, 14, 15], проведенного в среде AnyLogic.

На **Рис.3** представлена модель исследуемой системы в AnyLogic.

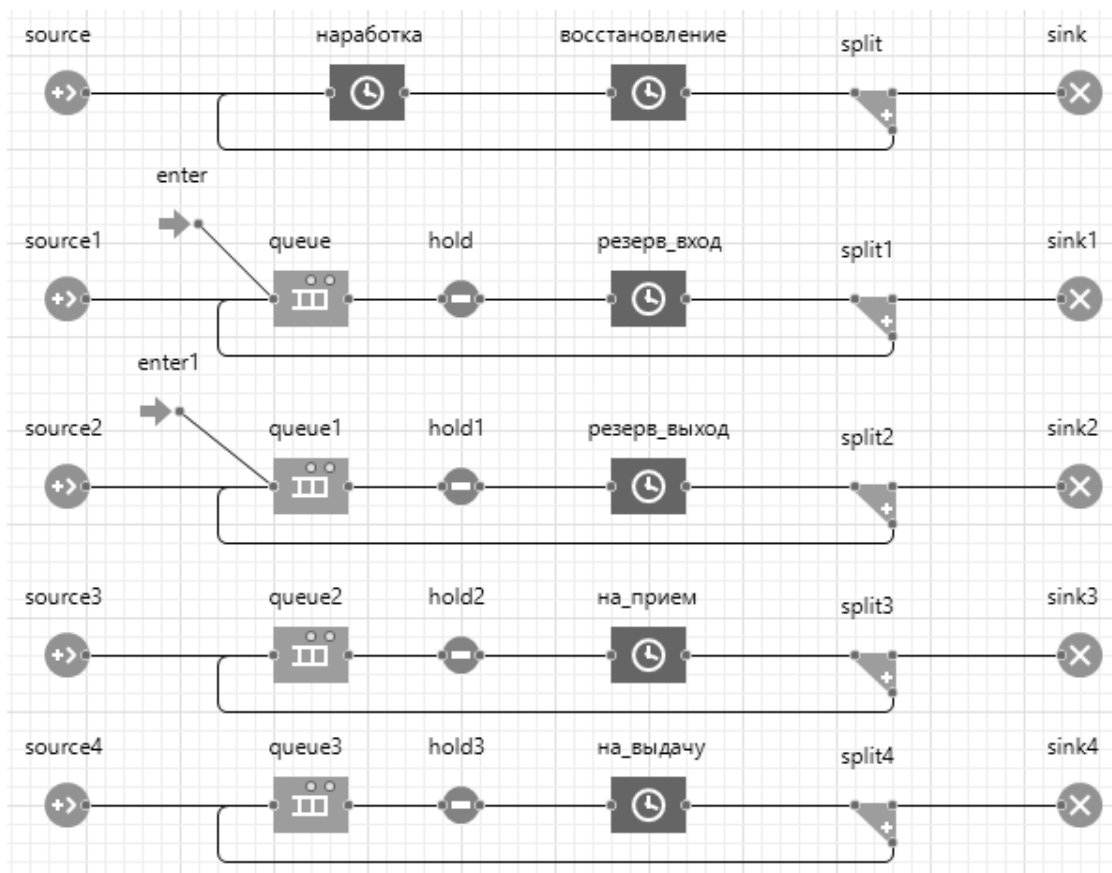


Рис.3 – Модель в AnyLogic

Модель функционирует следующим образом. Когда в блок восстановление поступает агент – имитируется состояние отказа технологической ячейки, с блоков hold и hold1 снимается блокировка, агенты проходят эти блоки и занимают блоки «резерв_вход» и «резерв_выход», чем имитируется работа накопителей (резерва времени), стоящих до и после технологической ячейки.

Когда агенты покидают блоки «резерв_вход» и «резерв_выход» – освобождаются блоки «на_прием» и «на_выдачу» соответственно.

Коэффициенты готовности работы системы на прием и на выдачу продукции соответствуют загруженности блоков «на_прием» и «на_выдачу».

Результаты имитационного моделирования сведены в таблицу 1

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования

	МО коэффициента готовности прием (имит.)	МО коэффициента готовности прием (аналит.)	МО коэффициента готовности выдача (имит.)	МО коэффициента готовности выдача (аналит.)
	0,934	0,950	0,925	0,945
Относительная погрешность, %	1,7		2,1	

Заключение

Полученные результаты подтверждают правильность аналитической модели сопряженного участка [2]. В дальнейших исследованиях планируется верификация других моделей, построенных с помощью метода траекторий.

Библиографический список

1. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем» Монография / В.Я. Копп. – Севастополь: СевНТУ, 2012 – 700с.
2. Zamoryonov M.V. “Storage Device – Cell – Storage Device” Structure Modeling / M.V. Zamoryonov, V.Ya. Kopp, D.V. Zamoryonova // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017.
3. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – Киев: Наукова думка, 1982. – 236 с.
4. Королюк В.С. Стохастические модели систем / В.С. Королюк. – Киев: Наукова думка, 1989. – 208 с.
5. Obzherin Yu.E. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures / Yu.E. Obzherin, E.G. Boyko. – USA, Elsevier, Academic Press, 2015. – 214 p.

6. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
7. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных линий / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: СевНТУ, 2006. – 240с.
8. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / линий / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: СевНТУ, 2000. – 284 с.
9. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
10. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
11. Броди С.М. Расчет и планирование испытаний систем на надежность / С.М. Броди, О.Н. Власенко, Б.Г. Марченко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 192 с.
12. Колмогоров А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа. Учебник для ун-тов. 6-е изд., испр. / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М.: Наука, 1989. – 623 с.
13. Боев В.Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов: Монография / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2011. – 404 с.
14. Сайт Дискретно-событийное моделирование. [электронный ресурс] // AnyLogic. Режим доступа: <http://www.anylogic.ru/discrete-event-simulation>
15. Сайт Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic. XJ Technologies: [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.xjtek.ru>

Bibliograficheskij spisok

1. Kopp V.YA. Modelirovaniye proizvodstvennykh sistem» Monografiya / V.YA. Kopp. – Sevastopol': SevNTU, 2012 – 700s.
2. Zamoronov M.V. Modelirovaniye struktury «nakopitel' – yacheyka – nakopitel'» / M.V. Zamoronov, V.YA. Kopp, D.V. Zamoronova // 2017 Mezhdunarodnaya konferentsiya po promyshlennomu inzhiniringu, prilozheniyam i proizvodstvu (ICIEAM). – 2017.
3. Korolyuk V.S. Protsessy markovskogo vosstanovleniya v nadezhnosti nadezhnosti sistem / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – Kiyev: Naukova dumka, 1982. – 236 s.

4. Korolyuk V.S. Stokhasticheskiye modeli sistem / V.S. Korolyuk. – Kiyev: Naukova dumka, 1989. – 208 s.
5. Obzherin YU.Ye. Polumarkovskiye modeli. Upravleniye vosstanavlivayemyimi sistemami pri skrytykh otkazakh / YU.Ye. Obzherin, Ye.G. Boyko. – SSHA, Elsevier, Academic Press, 2015. – 214 s.
6. Peschanskiy A.I. Polumarkovskiye modeli odnolineynykh ocheredey s poteryami i rekurrentnym vkhodom / A.I. Peschanskiy. – Germaniya: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 s.
7. Kopp V.YA. Modelirovaniye natsional'nykh strategiy / V.YA. Kopp, YU.Ye. Obzherin, A.I. Peschanskiy. – Sevastopol': SevNTU, 2006. – 240s.
8. Kopp V.YA. Stokhasticheskiye modeli proizvodstvennykh sistem s vremennym rezervirovaniyem / V.YA. Kopp, YU.Ye. Obzherin, A.I. Peschanskiy. – Sevastopol': SevNTU, 2000. – 284 s.
9. Baykhel't F. Nadezhnost' i tekhnicheskoye obsluzhivaniye. Matematicheskiy podkhod / F. Baykhel't, P. Franken. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 392 s.
10. Raynshke K. Otsenka nadezhnosti sistem s ispol'zovaniyem grafov / K. Raynshke, I.A. Ushakov. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 208 s.
11. Brodi S.M. Raschet i planirovaniye ispytaniy sistem na nadezhnost' / S.M. Brodi, O.N. Vlasenko, B.G. Marchenko. – Kiyev: Naukova dumka, 1970. – 192 s.
12. Kolmogorov A.N. Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza. Uchebnik dlya un-tov. 6-ye izd., ispr. / A.N. Kolmogorov, S.V. Fomin. – M.: Nauka, 1989. – 623 s.
13. Boyev V.D. Issledovaniye adekvatnosti GPSS World i AnyLogic pri modelirovanii diskretno-sobytiynykh protsessov: Monografiya / V.D. Boyev. – SPb.: VAS, 2011. – 404 s.
14. Sayt Diskretno-sobytiynoye modelirovaniye. [elektronnyy resurs] // AnyLogic. Rezhim dostupa: <http://www.anylogic.ru/discrete-event-simulation>
15. Sayt Mnogopodkhodnoye imitatsionnoye modelirovaniye v AnyLogic. XJ Technologies: [elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.xjtek.ru>

¹Заморёнов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент,
zatoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

²Мирзоян Наталия Юрьевна, ассистент, nymirzoyan@mail.sevsu.ru,
Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Заморёнов Илья Михайлович, студент, ilia.zamoryonov@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

SIMULATION MODEL IN ANYLOGIC OF THE STRUCTURE “DRIVE - TECHNOLOGICAL CELL - DRIVE”

M.V. Zamoryonov, N.Y. Mirzoyan, I.M. Zamoryonov

In this paper, we verify the analytical model of the conjugate section constructed using the trajectory method by comparing its simulation results with the results of simulation modeling. A simulation model in the AnyLogic is being developed. Using the simulation model, the coefficients of the readiness of the associated site for the issue of products and for their reception are determined. The indicated readiness coefficients of the uptime of the interfaced section obtained using the simulation and analytical models are compared. The calculation of the relative error of the results.

Key words: simulation model, verification, relative error, conjugate section

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

Mirzoyan Natalya Yurevna, assistant, nymirzoyan@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Zamoryonov Ilia Mikhailovich, student, ilia.zamoryonov@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

УДК 620.179.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ РУКИ НА ПОГРЕШНОСТЬ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Балакина Н.А.¹, Балакин И.А.²

Аннотация. Рассмотрены погрешности измерения координатно-измерительных машин. Построена математическая модель для оценки точности измерительной руки. Представлены результаты моделирования и проведен их анализ, показавший пределы использования различной точности изготовления линейных размеров звеньев измерительной руки при различной точности энкодеров.

Ключевые слова. Координатные измерения, энкодер, векторный анализ, погрешность, матрицы поворота, точность измерений, точность изготовления.

Надежность устройств, функционирование их узлов в заданном режиме, а значит, и ресурс в определяющей степени зависят от геометрической точности изготовления сопрягаемых деталей [1]. Повышение требований к качеству машин влечет за собой ужесточение допусков, и как следствие, увеличение трудоемкости операций контроля в технологическом процессе, совершенствование измерительных средств [1-7]. Для полного контроля деталей используются широкоуниверсальные, достаточно гибкие средства контроля – координатно-измерительные машины (КИМ). С их применением повышается точность и достоверность результатов измерений. В КИМ используется координатный метод измерения, заключающийся в последовательном нахождении координат ряда точек и последующему расчету. Главное достоинство координатного метода – возможность автоматизации процесса измерения и универсальность [1-7]. Данный метод имеет важное значение при измерении сложных поверхностей.

В настоящее время одной из возможных компоновок КИМ является измерительная рука, достоинством которой является мобильность и возможность производить измерения объектов сложной формы без использования сложных многоосевых измерительных головок. Недостатком измерительных рук по сравнению с классическими компоновками КИМ является более низкая точность проводимых измерений. Это возникает вследствие малой жесткости их конструкции. Однако несмотря на данный недостаток измерительные руки находят широкой применение в промышленности при осуществлении контрольных операций.

Погрешность измерения КИМ состоит из погрешности сбора информации – погрешности измерения координат точек и погрешности обработки и представления результатов измерений, которые в свою очередь, состоят из компонент, определяемых устройством аппаратурной части и системой программно-математического обеспечения КИМ, параметрами измеряемых деталей, факторами окружающей среды, источников энергии, времени измерений и эксплуатации КИМ [1].

По степени влияния на погрешность КИМ, определяемой аппаратурной частью, основными и практически равноценными компонентами являются механическая конструкция, реализующая координатную систему КИМ, измерительные системы и измерительная головка [1].

При анализе конструкции измерительных рук можно сделать вывод, что в их конструкциях отсутствует измерительная головка. Координаты считываются с измерительной системы при ручном управлении. Таким образом остаются две основные составляющие.

Погрешности координатных перемещений, измерительных систем возникают из-за погрешности их изготовления и юстировки, а также погрешностей, обусловленных принципом их действия. Кроме того, погрешности координатных перемещений зависят от статической и динамической жесткости подвижных узлов [1].

Таким образом, анализ влияния точности изготовления отдельных элементов, величин зазоров в сопряжениях и точности используемых измерительных систем (энкодеров) на погрешность измерительной руки является актуальной задачей.

Целью работы является исследование влияния точности изготовления длин звеньев измерительной руки и энкодеров на общую погрешность координатных измерений.

В данной статье рассмотрим семиосную измерительную руку, кинематическая схема которой представлена на **Рис.1**.

Для анализа точности работы измерительной руки воспользуемся элементами векторного анализа, используемого при проектировании робототехнических устройств [8].

Расставим системы координат следующим образом.

Неподвижную систему координат свяжем с неподвижным основанием.

С первым звеном свяжем систему координат повернутую относительно предыдущей на угол φ_1 вокруг оси z . Матрица поворота будет иметь вид:

$$M_{01} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) & 0 \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

где φ_1 – угол поворота первой системы координат относительно неподвижной системы координат.

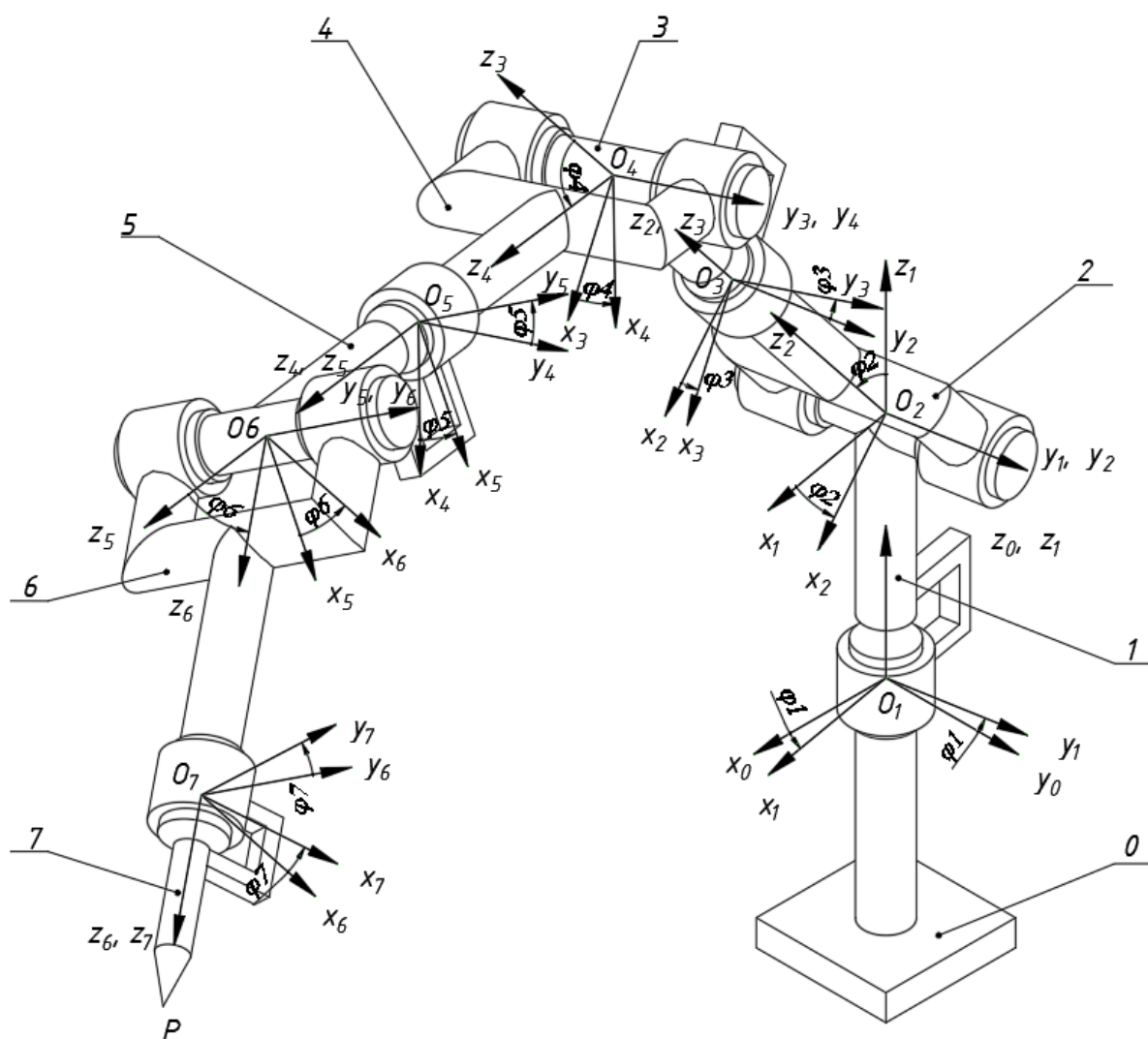


Рис.1 – Кинематическая схема измерительной руки

Остальные подвижные системы координат (Рис.1) располагаем аналогичным образом. Матрицы поворота соответствующих систем координат относительно друг друга приведены ниже.

$$M_{12} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_2) & 0 & \sin(\varphi_1) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_1) & 0 & \cos(\varphi_2) \end{vmatrix}, \quad M_{23} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_3) & -\sin(\varphi_3) & 0 \\ \sin(\varphi_3) & \cos(\varphi_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$M_{34} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_4) & 0 & \sin(\varphi_4) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_4) & 0 & \cos(\varphi_4) \end{vmatrix}, \quad M_{45} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_5) & -\sin(\varphi_5) & 0 \\ \sin(\varphi_5) & \cos(\varphi_5) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$M_{56} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_6) & 0 & \sin(\varphi_6) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_6) & 0 & \cos(\varphi_6) \end{vmatrix},$$

где $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ – углы поворота соответствующих систем координат относительно предыдущих.

Матрицы поворота подвижных систем координат равны произведению всех матриц поворота между рассматриваемой подвижной системой и неподвижной:

$$\begin{aligned} M_{02} &= M_{01} \cdot M_{12} \\ M_{03} &= M_{01} \cdot M_{12} \cdot M_{23} \\ M_{04} &= M_{01} \cdot M_{12} \cdot M_{23} \cdot M_{34} \\ M_{05} &= M_{01} \cdot M_{12} \cdot M_{23} \cdot M_{34} \cdot M_{45} \\ M_{06} &= M_{01} \cdot M_{12} \cdot M_{23} \cdot M_{34} \cdot M_{45} \cdot M_{56} \end{aligned}$$

Координаты точки в пространстве с учетом всех возможных поворотов данной измерительной руки представляет собой вектор

$$\overline{OP} = \overline{O_1O_2} + \overline{O_2O_3} + \overline{O_3O_4} + \overline{O_4O_5} + \overline{O_5O_6} + \overline{O_6O_7} + \overline{O_7P}$$

Определим координаты данных векторов в соответствующих подвижных системах координат.

$$O_1O_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ lz_1 \end{vmatrix}, \quad O_2O_3 = \begin{vmatrix} lz_2 \cdot \sin(\varphi_2) \\ 0 \\ lz_2 \cdot \cos(\varphi_2) \end{vmatrix}, \quad O_3O_4 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ lz_3 \end{vmatrix}, \quad O_4O_5 = \begin{vmatrix} lz_4 \cdot \sin(\varphi_4) \\ 0 \\ lz_4 \cdot \cos(\varphi_4) \end{vmatrix},$$

$$O_5O_6 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ lz_5 \end{vmatrix}, \quad O_6O_7 = \begin{vmatrix} lz_6 \cdot \sin(\varphi_6) \\ 0 \\ lz_6 \cdot \cos(\varphi_6) \end{vmatrix}, \quad O_7P = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ lz_7 \end{vmatrix},$$

где $lz_1, lz_2, lz_3, lz_4, lz_5, lz_6, lz_7$ – расстояния между началами систем координат, соответствующие длинам звеньев.

Перейдем от подвижных систем координат, в которых определены векторы к неподвижной системе координат. Перемножим вектора на соответствующие матрицы поворота, в результате получим:

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

Подставив в (1) соответствующие выражения, получим координаты точки P в неподвижной системе координат:

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

Введу громоздкости полученных выражений в данной работе они не приводятся.

При проведении координатных измерений важно не только знать координаты точек, но и необходимо оценивать погрешность их определения. Таким образом стоит задача нахождения предельной суммарной погрешности измерительной руки.

Ввиду очень большого числа факторов, влияющих на результат измерения, и невозможности или большой сложности формальной оценки этого влияния (в частности не известна погрешность измерения отдельной точки поверхности) речь по существу может идти только о возможной максимальной или средней вероятностной оценки погрешности. Практически ориентировочная максимальная погрешность измерения на КИМ может оцениваться как

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

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

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

Для решения данной задачи найдем вектор погрешности координат точки P .

В качестве первичных ошибок рассмотрим ошибки определения углов поворота, вызванные в первую очередь погрешностями энкодеров и погрешности длин звеньев измерительной руки. Вектор погрешности координат точки P имеет вид:

$$\overline{OP}(\Delta) = f(lz_1 + \Delta lz_1, lz_2 + \Delta lz_2, lz_3 + \Delta lz_3, lz_4 + \Delta lz_4, lz_5 + \Delta lz_5, lz_6 + \\ + \Delta lz_6, lz_7 + \Delta lz_7, \varphi_1 + \Delta \varphi_1, \varphi_2 + \Delta \varphi_2, \varphi_3 + \Delta \varphi_3, \varphi_4 + \Delta \varphi_4, \varphi_5 + \Delta \varphi_5, \varphi_6 + \Delta \varphi_6) \quad (3)$$

Погрешность определения координат точки P определяются выражением:

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

С учетом выражений (1) и (3) получим:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta OP} = & f(lz_1, lz_2, lz_3, lz_4, lz_5, lz_6, lz_7, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6) - \\ & - f(lz_1 + \Delta lz_1, lz_2 + \Delta lz_2, lz_3 + \Delta lz_3, lz_4 + \Delta lz_4, lz_5 + \Delta lz_5, lz_6 + \\ & + \Delta lz_6, lz_7 + \Delta lz_7, \varphi_1 + \Delta \varphi_1, \varphi_2 + \Delta \varphi_2, \varphi_3 + \Delta \varphi_3, \varphi_4 + \Delta \varphi_4, \varphi_5 + \Delta \varphi_5, \varphi_6 + \Delta \varphi_6) \end{aligned}$$

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

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

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

Моделирование погрешности измерительной руки осуществляется при следующих значениях конструктивных параметров:

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

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

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

Проведем многофакторный эксперимент. В результате моделирования определялась предельная суммарная погрешность измерительной руки $\Delta_{np\Sigma} = f(x_1, x_2)$. Уровни варьирования факторов выбирались следующие: погрешность энкодеров $\tilde{x}_1 = [150''; 75''; 60''; 30''; 10''; 5'']$, качества $\tilde{x}_2 = [5; 6; 7]$.

Результаты расчета предельной суммарной погрешности измерительной руки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета предельной суммарной погрешности измерительной руки

Погрешность энкодеров, с	150			75			60			30			10			5		
Квалитет	5	6	7	5	6	7	5	6	7	5	6	7	5	6	7	5	6	7
$\Delta_{np\Sigma}$, мм	3,1546	3,1491	3,1380	1,5706	1,5673	1,5638	1,2544	1,2524	1,2598	0,6261	0,6392	0,6855	0,2467	0,2871	0,4064	0,1831	0,2441	0,3772

Проанализируем полученные результаты. При использовании энкодеров с погрешностью больше 60 секунд, точность изготовления линейных звеньев оказывает малое влияние на общую погрешность $\Delta_{np\Sigma}$ – не более 0,52%. Однако при увеличении точности энкодеров влияние этой погрешности значительно увеличивается.

Если в качестве опорного значения взять погрешность измерительной руки при изготовлении ее звеньев по 5 качеству и считать погрешность от нее, то получим следующие результаты (таблица 2):

Таблица 2 – Результаты расчета относительной погрешности от точности линейных размеров звеньев измерительной руки

Погрешность энкодеров, с	30			10			5		
Квалитет	5	6	7	5	6	7	5	6	7
$\Delta_{np\Sigma}$, мм	0,626	0,639	0,685	0,246	0,287	0,406	0,183	0,244	0,377
Относительная погрешность, %	0	2,09	9,48	0	16,41	64,75	0	33,31	105,9

Выводы:

При использовании энкодеров высокой точности (не менее 30") целесообразно применять 5 и 6 квалитеты для изготовления линейных звеньев измерительной руки. В остальных случаях можно рекомендовать использовать 7 квалитет, что позволит уменьшить стоимость изготовления при незначительном увеличении предельной суммарной погрешности измерительной руки.

Библиографический список

1. Гапшис В.-А.А. Координатные измерительные машины и их применение / В.-А.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов [и др.] – М.: Машиностроение, 1988 – 328 с.
2. Кобринский А.Е. Автоматизация измерений при применении координатных измерительных машин / А.Е. Кобринский, Е.И. Левковский, А.Е. Рукин [и др.] // Станки и инструменты. – 1979. – № 1 – С. 9-12
3. Григораш О.В. Алгоритм и средства модернизации системы управления координатно-измерительной машины: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.13.05. – Казань, 2010. – 22 с.
4. Хорлоогийн А.С. Точность координатных средств измерений / А.С. Хорлоогийн, О.С. Астапчик, Д.В. Дубицкий // 9-я межд. науч.-техн. конф.

«Приборостроение -2016». – 2016. – С. 229-231.

5. Бражкин Б.С. Координатно-измерительные машины для контроля тел вращения / Б.С. Бражкин [и др.]. – Москва: Миттель Пресс, 2012. – 207 с.
6. Никольский С.М. Исследование влияния температуры на точность работы координатно-измерительной машины / С.М. Никольский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – №4. – С. 417-423.
7. Зубарев Ю.М. Автоматизация координатных измерений в машиностроении: учебное пособие для вузов / Ю. М. Зубарев, С. В. Косаревский. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 160 с.
8. Зенкевич С.Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. пособие / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Gapshis V.-A.A. Koordinatnye izmeritel'nye mashiny i ih primeneniye / V.-A.A. Gapshis, A.YU. Kasparajtis, M.B. Modestov [i dr.] – M.: Mashinostroenie, 1988 – 328 s.
2. Kobrinskij A.E. Avtomatizaciya izmerenij pri primenenii koordinatnyh izmeritel'nyh mashin / A.E. Kobrinskij, E.I. Levkovskij, A.E. Rukin [i dr.] // Stanki i instrumenty. – 1979. – № 1 – S. 9-12
3. Grigorash O.V. Algoritm i sredstva modernizacii sistemy upravleniya koordinatno-izmeritel'noj mashiny: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk: 05.13.05. – Kazan', 2010. – 22 s.
4. Horloogijn A.S. Tochnost' koordinatnyh sredstv izmerenij / A.S. Horloogijn, O.S. Astapchik, D.V. Dubickij // 9-ya mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Priborostroenie -2016». – 2016. – S. 229-231.
5. Brazhkin B.S. Koordinatno-izmeritel'nye mashiny dlya kontrolya tel vrashcheniya / B.S. Brazhkin [i dr.]. – Moskva: Mittel' Press, 2012. – 207 s.
6. Nikol'skij S.M. Issledovanie vliyaniya temperatury na tochnost' raboty koordinatno-izmeritel'noj mashiny / S.M. Nikol'skij // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – №4. – S. 417-423.
7. Zubarev YU.M. Avtomatizaciya koordinatnyh izmerenij v mashinostroenii: uchebnoe posobie dlya vuzov / YU. M. Zubarev, S. V. Kosarevskij. – 4-e izd., ster. – Sankt-Peterburg : Lan', 2021. – 160 s.
8. Zenkevich S.L. Upravlenie robotami. Osnovy upravleniya manipulyacionnymi robotami: ucheb. posobie / S.L. Zenkevich, A.S. YUshchenko. – M.: izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2000. – 400 s.

¹Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель,
NABalakina@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

²Балакин Игорь Алексеевич, студент, ibalakin72@gmail.com, Россия,
Севастополь, Севастопольский государственный университет

*RESEARCH OF INFLUENCE OF MEASURING ARM MANUFACTURING
ACCURACY ON COORDINATE MEASUREMENT ERROR*

N.A. Balakina, A.I. Balakin

Measurement errors of coordinate measuring machines are considered. A mathematical model for estimating the accuracy of a measuring arm is constructed. Simulation results are presented and their analysis is carried out, showing the limits of using different accuracy of the linear dimensions of measuring arm links with different accuracy of encoders.

Keywords: coordinate measurements, encoder, vector analysis, error, rotation matrices, measurement accuracy, manufacturing accuracy.

Balakina Nataliya Anatolievna, senior lecturer, NABalakina@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Balakin Igor Alekseevich, student, ibalakin72@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №1(21) 2023 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

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

Адрес редакции:

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

Телефон редакции: 8(692)550077

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

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

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 03.05.2023. Заказ 20/2023. Дата выхода в свет: 12.05.2023. Тираж: 50 экз.
Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 10,23.

Севастополь, 2023