

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№2(6)
2019

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

Выходит 4 раза в год

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

Брянск 2019 г.

Главный редактор

Копп В.Я., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Заместитель главного редактора

Филипович О.В., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Научный редактор

Бохонский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Ответственный секретарь

Осипов К.Н., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Пашков Е.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Краснодубец Л.А., д.т.н.,

проф.

(г. Севастополь)

Скатков А.В., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Песчанский А.И., д.т.н., проф.

(г. Севастополь)

Рзаев Р.Р., д.т.н., проф.

(г. Баку)

Прейс В.В., д.т.н., проф.

(г. Тула)

Кристалль М.Г., д.т.н., проф.

(г. Волгоград)

Дьяченко В.А., д.т.н., проф.

(г. Санкт-Петербург)

Волков А.Н., д.т.н., проф.

(г. Санкт-Петербург)

Доронина Ю.В., д.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Качур С.М., д.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Васютенко А.П., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Балакин А.И., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Круговой А.Н., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Скидан А.А., к.т.н., доц.

(г. Севастополь)

Заморёнов М.В., к.т.н.

(г. Севастополь)

Майстришин М.М., к.т.н.

(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

В номере отпечатаны материалы международной научно-технической конференции «Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения» АППР-2019

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

- Бохонский А.И., Майстришин М.М.** Конструирование управлений перемещением объектов. 3
- Варминская Н.И.** Анализ форм движения антропоморфного манипулятора. 10
- Бахадиров Г.А., Мусиров М.У., Набиев А.М.** Условия деформирования листового материала с постоянной массой между валковой парой 20

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Доронина Ю.В.** Моделирование изменчивости взаимосвязей элементов в сложной технической системе 26
- Мезенцев Ю.А.** Оптимизация расписаний систем несвязанных параллельных приборов с задержками начала обслуживания 34
- Карташов Л.Е., Копп В.Я., Заморёнов М.В.** Аппроксимация закона Вейбулла смесями специального распределения Эрланга и нормированного распределения Эрланга 46
- Скороход Б.А., Жиликов П.В.** Алгоритмы слежения за объектами в рабочем пространстве антропоморфного робота. 58

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Васютенко А.П., Тараховский А.Ю.** Широкопределный пневматический преобразователь 66
- Карлов А.Г.** Особенности эволюции и применения компьютерных технологий, поддерживающих процессы генерации изобретательских идей 75
- Костина А.А., Серов А.Н., Левашов И.В.** Особенности применения фазового сдвига для измерения реактивной мощности 81
- Левашов И.В., Серов А.Н., Костина А.А.** Особенности реализации метода измерения частоты, основанного на переходах сигнала через нуль 88

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И ТЕНОЛОГИИ

- Пашков Е.В.** Комбинированный инструмент для сверления глухих кольцевых отверстий в костной ткани и отрезки образовавшегося целостного керна 97

Учредитель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Российская Федерация, Севастополь, ул. Университетская 33. № рег. СМ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт.2018 г.

Издатель: 1. ФГАОУ ВО Российская Федерация, «Брянский государственный технический университет», 241035, г. Брянск, бул.50 лет Октября, 7;
2. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Российская Федерация, Севастополь, ул. Университетская 33.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© Авторы статей

УДК 65.011.56:621.65.8

КОНСТРУИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ

Бохонский А.И.¹, Майстришин М.М.²

Аннотация. Сконструированные новые типы оптимальных управлений переносным движением объектов сравниваются по критериям – энергоемкости, принципа действия и энергодействия с другими ранее известными управлениями. Показано, что целенаправленное конструирование управлений не исключает в отдельных случаях снижение энергии на его реализацию.

Ключевые слова. Оптимальное управление, энергоемкость управлений, принцип действия, энергодействие, деформируемый объект, достижение абсолютного покоя.

Классическим исследованиям по теории оптимального управления движения объектов как абсолютно твердых и деформируемых систем посвящены работы [1–5]. Математическая теория оптимальных процессов [6] явилась эффективным качественным скачком в развитии и расширении применения теории оптимального управления в технике.

В работе [7–11] осуществлялась попытка при решении полной обратной задачи динамики управляемых систем найти новые оптимальные управления, которые не ухудшали бы процесс целенаправленного движения объектов как абсолютно твердых, так и деформируемых систем. На достаточно простых примерах были количественно оценены закономерности поведения управляемых объектов и энергоемкость управлений.

В работе [11] показано, что существует достаточно широкий класс оптимальных кососимметричных управлений перемещением объектов как абсолютно твердых и деформируемых систем. Обращает на себя внимание реальная возможность дальнейшего расширения такого класса управлений, например, за счет использования комбинаций ранее найденных [11] и исследованных управлений в виде периодических гармонических функций.

Цель исследований – сравнение отдельных сконструированных типов оптимального управления переносным движением объектов по критериям энергоемкости, наименьшего действия и энергодействия.

Приводятся примеры оптимального управления движением объектов.

1. Одной из возможных комбинаций из прежних кососимметричных управлений [7-10] может быть аналитическая функция вида:

$$U_e(t) = a \sin^2(pt) \cdot \cos(pt) \quad (1)$$

где a, p – константы. С учетом интегральных зависимостей $V_e(t) = \int U_e(t) dt$, $S_e(t) = \int V_e(t) dt$ при краевых условиях $S_e(0) = 0$, $V_e(0) = 0$, $S_e(T) = L$ получено выражение для максимального значения ускорения (управления):

$$a = \frac{9Lp^2}{-2 + \sin^2(pT)\cos(pT) + 2\cos(pT)}. \quad (2)$$

Анализ оптимального поведения объекта выполнен при исходных данных: $L = 1\text{ м}$; $p = \frac{\pi}{2}$; $T = 2\text{ с}$; $a = \frac{9\pi^2}{16} \text{ с}^{-2}$. Графики перемещения, скорости и ускорения в управляемом движении объекта единичной массы изображены на **Рис.1**.

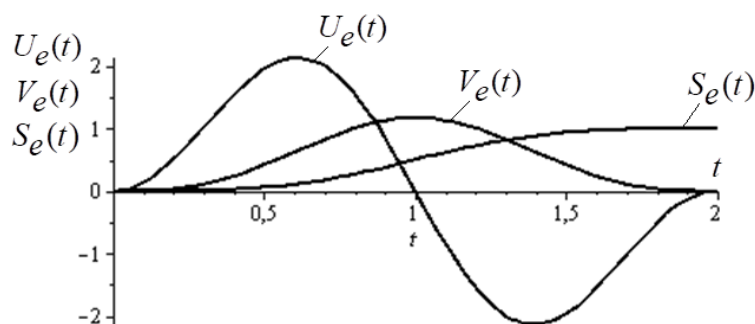


Рис.1 – Графики: перемещение $S_e(t)$, скорость $V_e(t)$ и ускорение $U_e(t)$ (управление на единицу массы)

Энергия, затраченная на управление, вычисляется согласно зависимости

$$A = 2 \int_0^{T/2} m U_e(t) V_e(t) dt = 1,398 \text{ Дж}.$$

Действие по Лагранжу равно

$$E = \int_0^T V_e^2(t) dt = 0,867 \text{ Джс}.$$

Принят следующий дополнительный критерий – энергодействия

$$A \cdot E = 1,204 \text{ Дж}^2 \text{ с}.$$

2. В достаточно общем случае не исключается следующее управление

$$U_e(t) = a \sin^4(pt) \cdot \cos(pt).$$

После аналогичных аналитических преобразований для амплитудного значения ускорения получена формула:

$$a = \frac{75Lp^2}{-8 + 3\sin^4(pT)\cos(pT) + 4\sin^2(pT)\cos(pT) + 8\cos(pT)},$$

В которой с учетом прежних исходных данных найдено $a = \frac{75}{64}\pi^2$. Графики $S_e(t)$, $V_e(t)$, $U_e(t)$ изображены на **Рис.2**.

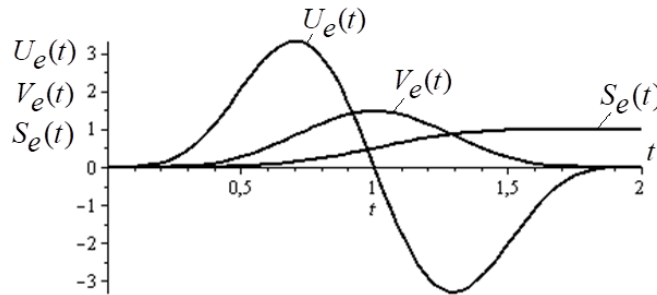


Рис.2 – Графики перемещения, скорости и ускорения в переносном движении

Для данного примера значения критериев:

$$A = 2,17 \text{ Дж}, \quad E = 1,07 \text{ Джс}, \quad A \cdot E = 2,315 \text{ Дж}^2\text{с}.$$

Относительное движение упругой системы (с одной степенью свободы) описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2 X_r}{dt^2} + k^2 X_r = -\frac{75}{16} L p^2 \sin^4(pt) \cos(pt). \quad (3)$$

В случае, например, объекта с частотой собственных колебаний $k = 11 \text{ с}^{-1}$ за общее время движения $T = 2 \text{ с}$ достигается относительный покой. Графики X_r и V_r изображены на **Рис.3**.

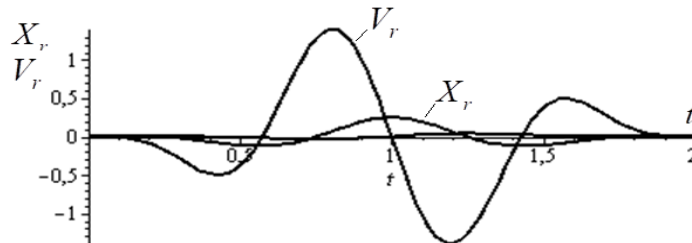


Рис.3 – Графики перемещения и скорости в относительном движении

Моментные соотношения $X_r(T) = 0$, $\dot{X}_r(T) = 0$, которые преобразуются к $X_r = X_r(k)$, $V_r = V_r(k)$, при их графическом изображении в интервале $4,5 \text{ с}^{-1} \geq k \geq 10,5 \text{ с}^{-1}$ подтверждают существование двух общих корней для частот собственных колебаний, при которых достигается абсолютный покой в момент времени $t = T$ (естественно, что с последующем отключением управления).

3. Представляет интерес сравнение полученных ранее управлений с эталонным релейным

$$U_e(t) = a \left(H(t) - 2H\left(1 - \frac{T}{2}\right) + H(t - T) \right). \quad (4)$$

Графики $S_e(t)$, $V_e(t)$, $U_e(t)$ для этого случая движения изображены на **Рис.4**.

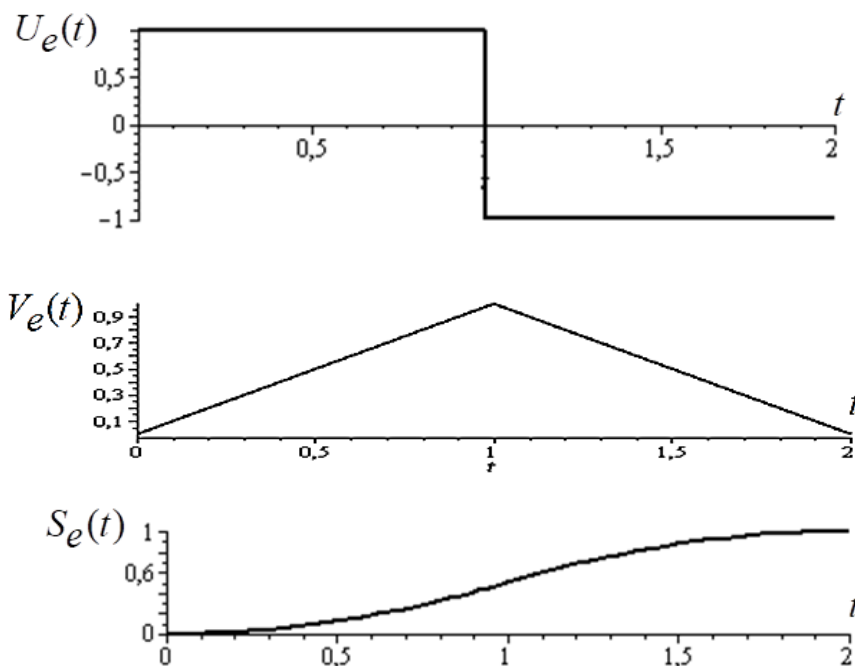


Рис.4 – Графики перемещения, скорости и ускорения в переносном движении при релейном управлении

В момент времени $t = T$ достигается переносный покой $V_e(T) = 0$.

При таком управлении значения критериев:

$$A = 1 \text{ Дж}, \quad E = 0,67 \text{ Джс}, \quad A \cdot E = 0,67 \text{ Дж}^2\text{с}.$$

Полученные результаты сравнивались также с известным классическим управлением:

$$U_e(t) = \frac{a(T - 2t)}{T}, \quad (5)$$

где $a = \frac{6L}{T^2}$. Для этого управления графики изображены на **Рис.5**.

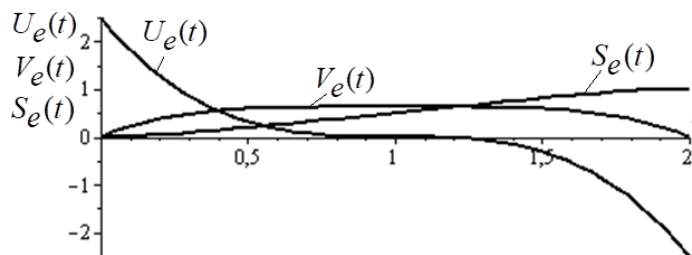


Рис.5 – Графики перемещения, скорости и ускорения в переносном движении при классическом управлении

Вычислены критерии: $A = 0,56 \text{ Дж}$, $E = 0,6 \text{ Джс}$, $A \cdot E = 0,3475 \text{ Дж}^2\text{с}$.

4. Существенная экономия энергии для реализации оптимального управления появляется уже при управлении (разгон-торможение) согласно зависимости

$$U_e(t) = \frac{a(T-2t)^3}{T^3}, \quad (6)$$

где $a = \frac{10L}{T^2}$. При таком управлении скорость переносного движения равна:

$$V_e(t) = \frac{a(T-t)(2T^2 - 2Tt + T^2)}{T^3}.$$

Значения критериев: $A = 0,39$ Дж, $E = 0,55$ Джс, $A \cdot E = 0,217$ Дж²с.

Важно отметить, что с ростом степени полинома $U_e(t) = \frac{a_n(T-2t)^n}{T^n}$

асимптотически снижаются энергозатраты на реализацию управляемого движения. Данный тип управления обладает наименьшей энергоемкостью.

5. Для простого примера оптимального управления $U_e(t) = \sin(pt)\cos(pt)$ восстановленное дифференциальное уравнение (уравнение Эйлера) имеет вид:

$$\frac{d^2 S_e}{dt^2} + 4p^2 S_e = \frac{4Lp^3}{\pi} t. \quad (7)$$

Уравнению (7) соответствует функционал-критерий

$$J = \int_0^T \left[\frac{1}{2} \left(\frac{dS_e}{dt} \right)^2 - 4p^2 \left(\frac{S_e}{2} \right)^2 + \frac{4Lp^3 t}{\pi} S_e \right] dt. \quad (8)$$

Восстановленный реверсионно функционал (8) согласно достаточным условиям Якоби, Вейерштрасса, Лежандра имеет минимум, что подтверждается также в результате построения графического образа функционала согласно методике, приведенной в [11].

Конструирование управлений переносным движением объектов, предполагающее достижение цели движения с учетом ограничений, расширяет класс оптимальных управлений движением абсолютно твердых и упругих объектов. В случае деформируемых твердых тел время движения выбирается с использованием моментных соотношений в относительном движении (равенство нулю перемещения и скорости в конце движения [3, 9 – 11].

Библиографический список

1. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476с.
2. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
3. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А.Карновский, Ю.М.Почтман. – К.: Высш. школа, 1982. – 116 с.
4. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 236 с.
5. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.

6. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе. – М.: Наука, 1983. – 391 с.
7. Бохонский А.И. Экстремум реверсионно восстановленного функционала оптимального перемещения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Механика, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. – С. 44 – 48.
8. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов / А.И. Бохонский // Фундаментальные основы механики: матер. междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 38 – 41.
9. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Мозолевский М.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения. Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во Сев ГТУ, 2007. – 296 с.
10. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice.: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
11. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Krasovskiy N.N. Teoriya upravleniya dvizheniyem / N.N. Krasovskiy. – М.: Nauka. 1968.– 476s.
2. Krutko P.D. Obratnyye zadachi dinamiki upravlyayemykh sistem: lineynyye modeli. – М.: Nauka. 1987. – 304 s.
3. Karnovskiy I.A. Metody optimalnogo upravleniya kolebaniyami deformiruyemykh sistem / I.A.Karnovskiy. Yu.M.Pochtman. – K.: Vyssh. shkola. 1982. – 116 s.
4. Troitskiy V.A. Optimalnyye protsessy kolebaniy mekhanicheskikh sistem / V.A. Troitskiy. – L.: Mashinostroyeniye. 1976. – 236 s.
5. Chernousko F.L. Upravleniye kolebaniyami / F.L. Chernousko. P.D. Akulenko. B.N. Sokolov. – М.: Nauka. 1980. – 384 s.
6. Pontryagin L.S. Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov / L.S. Pontryagin. V.G. Boltyanskiy. R.V. Gamkrelidze. – М.: Nauka. 1983. – 391 s.
7. Bokhonskiy A.I. Ekstremum reversionno vosstanovlennogo funktsionala optimalnogo peremeshcheniya obyektov / A.I. Bokhonskiy. N.I. Varminskaya // Mekhanika. avtomatika i robototekhnika: mater. mezhdunar. nauch.-praktich. konf. – Novokuznetsk: NITs MS. 2019. – S. 44 – 48.
8. Bokhonskiy A.I. Energoyemkost upravleniya peremeshcheniyem obyektov / A.I. Bokhonskiy // Fundamentalnyye osnovy mekhaniki: mater. mezhdunar. nauch.-praktich. konf. – Novokuznetsk: NITs MS. 2017. – S. 38 – 41.
9. Bokhonskiy A.I.. Varminskaya N.I.. Mozolevskiy M.I. Optimalnoye upravleniye perenosnym dvizheniyem deformiruyemykh obyektov: teoriya i tekhnicheskkiye prilozheniya. Pod obshch. red. A.I. Bokhonskogo. – Sevastopol: Izd-vo Sev GTU. 2007. – 296 s.
10. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky. S.Y. Zolkiewski. – Gliwice.: Wydawnictwo Politechniki. 2011. – 171 r.

11. Bokhonskiy A.I. Reversionnyy printsip optimalnosti / A.I. Bokhonskiy. – М.: Vuzovskiy uchebnyk: INFRA-M. 2016. – 174 s.

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

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

CONSTRUCTION OF MANAGERIAL ACTIONS BY MOVEMENT OF OBJECTS

Bokhonsky A.I., Maystrishin M.M.

Designed new types of optimal controls are compared by criteria - energy intensity, principle of operation and energy-action with other known controls. It is shown that purposeful design of controls does not exclude, in some cases, a decrease in energy for its implementation

Key words: Optimal control, energy intensity of controls, principle of action, principle of energy action, deformable object, achieving absolute rest.

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

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

АНАЛИЗ ФОРМ ДВИЖЕНИЯ АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Варминская Н.И.¹

Аннотация. Предложена модель оптимального управления движением антропоморфного трехзвенного манипулятора с невесомыми звеньями и сосредоточенными массами в узлах. С использованием энергетического критерия, принципа действия и энергодействия выявлена предпочтительная форма движения, при которой достижение цели движения приводит к снижению энергетических затрат на его реализацию.

Ключевые слова: оптимальное движение, принцип наименьшего действия, форма движения, энергетические затраты.

Введение. Исследованию кинематики и динамики робототехнических систем посвящены, например, работы [1–3, 5]. Однако, продолжают оставаться актуальными задачи поиска форм движения манипуляторов конечной жесткости с учетом различных законов управления перемещением их звеньев.

Основы оптимального управления систем изложены, например, в работах [6 – 7].

Конструирование оптимальных управлений перемещением объектов как абсолютно твердых тел и деформируемых систем рассмотрено, например, в работах [4, 8, 9], в которых приведены некоторые технические приложения управлений, уже известных или полученных на основании реверсионного принципа оптимальности (согласно РПО функционал-критерий восстанавливается по функции через уравнение Эйлера [4, 8]).

Практическая реализация оптимальных управлений влечет за собой решение новых задач поиска рациональной формы движения многозвенных механизмов с учетом минимума энергетических затрат на достижение цели движения (требуемого конечного состояния центра масс схвата с грузом) на основании различных критериев, в том числе – принципа действия и «обобщенного мультипликативного критерия энергодействия» [11].

Исследуется модель оптимального управления движением антропоморфного трехзвенного манипулятора (три степени свободы) с невесомыми звеньями и сосредоточенными массами в узлах; найдены энергетические затраты на реализацию движения в зависимости от формы движения. Формы движения руки манипулятора предполагаются заданными, т.е. известны начальное и конечное положения звеньев руки, которые определяют ее движение из исходного состояния в конечное.

В общем случае форма движения манипулятора из числа возможных может быть найдена на основании принципа наименьшего действия в форме Лагранжа [10]:

$$2 \int_0^{t_1} T dt = \min, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия руки манипулятора в произвольный момент времени; t_1 – заданное общее время движения руки, которое одинаково для всех форм движения.

Согласно (1) действительной формой движения, как наилучшей из виртуальных, будет та, для которой принцип действия принимает наименьшее значение.

Цель исследований – выбор рациональной формы движения для трехзвенного антропоморфного манипулятора с привлечением принципа действия и учета энергоемкости движения, а также с использованием дополнительного «обобщенного мультипликативного критерия энергодействия».

Выполнено моделирование движения трехзвенного антропоморфного манипулятора из исходного в конечное состояние покоя с использованием различных законов управления; при этом начальное и конечное положения звеньев руки заранее известны.

Известное в литературе [6, 7] управление вращением звена руки манипулятора (угловое ускорение), полученное на основании критерия минимума так называемой нормы мощности

$$J_1 = \int_0^{t_1} U_1^2 dt,$$

имеет вид:

$$U_1 = \varepsilon(t) = \frac{6\varphi_*}{t_1^2} \left(1 - \frac{2t}{t_1} \right), \quad (2)$$

где φ_* – угол поворота; t_1 – общее время движения. После интегрирования при заданных граничных условиях

$$\varphi_e(0) = 0, \quad \dot{\varphi}_e(0) = \omega_e(0) = 0, \quad \varphi_e(t_1) = \varphi_*, \quad \dot{\varphi}_e(t_1) = 0$$

получены следующие выражения для угловой скорости и угла поворота

$$\omega(t) = \dot{\varphi}(t) = \frac{6\varphi_*}{t_1^2} \left(t - \frac{t^2}{t_1} \right); \quad \varphi(t) = \frac{6\varphi_*}{t_1^2} \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3t_1} \right).$$

Графики $\varphi(t)$, $\omega(t)$, $\varepsilon(t)$ изображены на **Рис.1**.

Для оценки движения рассмотрено управление в виде гармонической функции. В случае критерия

$$J_2 = \int_0^T \left(\frac{\dot{U}^2}{2} - p^2 \frac{U^2}{2} \right) dt,$$

после решения уравнения Эйлера $F_{U_e} - \frac{d}{dt} F_{\dot{U}_e} = 0$ и преобразований получены выражения для перемещения, скорости и ускорения:

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_*}{2\pi} (pt - \sin pt), \quad \omega(t) = \frac{\varphi_* p}{2\pi} (1 - \cos pt), \quad U_2 = \varepsilon(t) = \frac{\varphi_* p^2}{2\pi} \sin pt. \quad (3)$$

Графики $\varphi(t)$, $\omega(t)$, $\varepsilon(t)$ изображены на Рис.2.

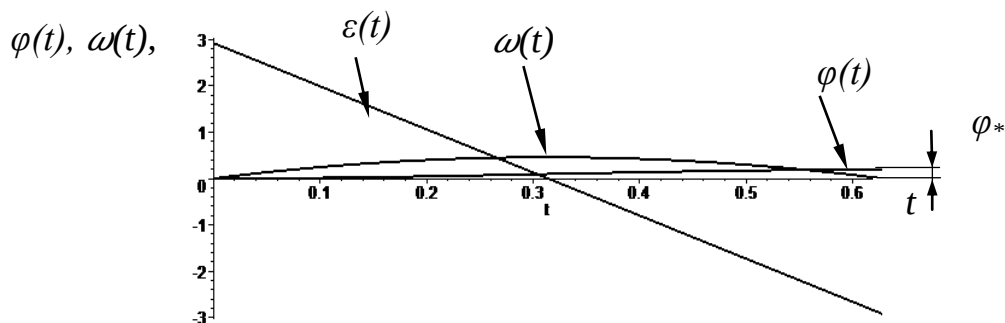


Рис.1 – Графики угла поворота, скорости и ускорения (управления)

Энергия, затраченная на реализацию движения, вычисляется по формуле

$$A = 2 \int_0^{t_1/2} M_1(t) \dot{\varphi}_1(t) dt + 2 \int_0^{t_1/2} M_2(t) \dot{\varphi}_2(t) dt + 2 \int_0^{t_1/2} M_3(t) \dot{\varphi}_3(t) dt.$$

где M_1, M_2, M_3 – моменты в приводах (в узлах руки манипулятора); $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3$ – угловые скорости звеньев.

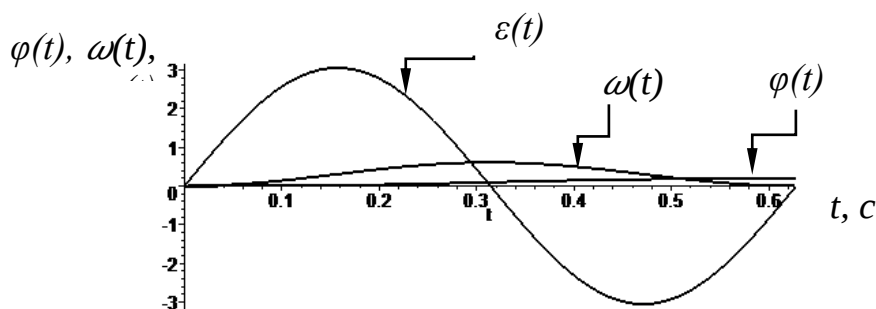


Рис.2 – Графики угла поворота, скорости и ускорения согласно (3)

Моменты в приводах как обобщенные силы – правые части уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_i} = M_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

Кинетическая энергия вычислена для различных форм движения – достижения заданной точки центром масс схвата.

1. Первая форма движения. Рассмотрено движение трехзвенного антропоморфного манипулятора (Рис.3) из исходного состояния покоя (положение I) в конечное (положение II). При этом первые два звена совершают вращательное движение как единое целое, а третье – плоскопараллельное движение.

Для определения конечных углов поворота звеньев при достижении центром масс схвата точки с координатами x_1, y_1 для первой формы движения составлены зависимости между заданными декартовыми координатами конечной точки (x_1, y_1) и конечными углами поворотов $(\varphi_1^*, \varphi_3^*)$ звеньев, представляющих собой систему трансцендентных уравнений:

$$\begin{aligned}(l_1 + l_2) \cos(\varphi_1^*) + l_3 \cos(\varphi_3^*) - y_1 &= 0, \\ (l_1 + l_2) \sin(\varphi_1^*) + l_3 \sin(\varphi_3^*) - x_1 &= 0.\end{aligned}\quad (4)$$

Система уравнений (4) решена численно для исходных данных: $l_1 = 0,38$ м; $l_2 = 0,28$ м; $l_3 = 0,21$ м; $x_1 = 0,32$ м; $y_1 = 0,7$ м. При этом получены следующие значения конечных углов (в радианах и градусах): $\varphi_1^* = 0,173$ (11,02°); $\varphi_3^* = 1,392$ (79,75°).

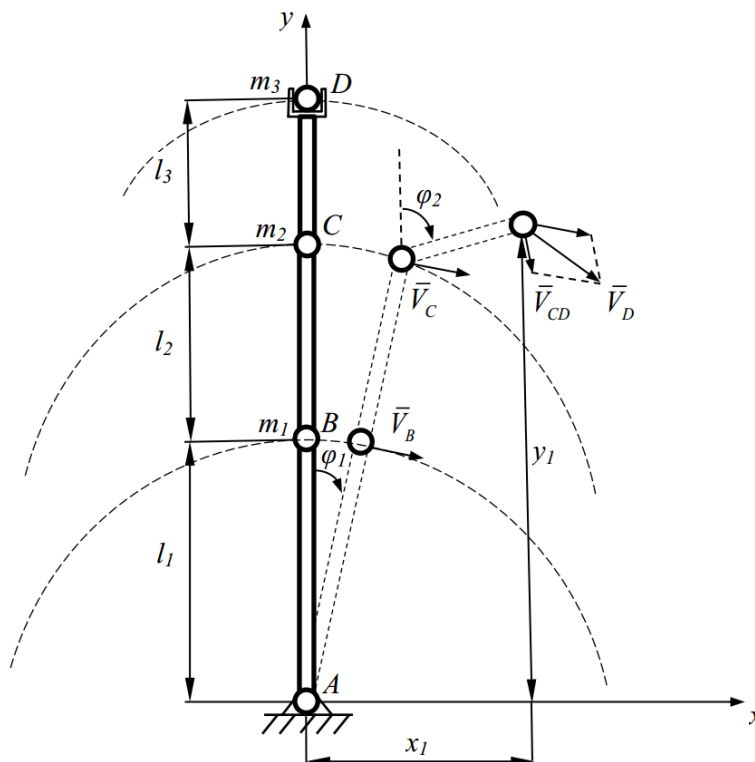


Рис.3 – Схема движения (первая форма движения)

При движении по первой форме кинетическая энергия

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (l_1 + l_2)^2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 \left((l_1 + l_2)^2 \dot{\varphi}_1^2 + l_3^2 \dot{\varphi}_3^2 + 2(l_1 + l_2) l_3 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3) \right)$$

где m_1, m_2, m_3 – сосредоточенные массы в узлах; l_1, l_2, l_3 – длины звеньев руки манипулятора; $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_3$ – угловые скорости звеньев.

Из уравнений Лагранжа следуют выражения для моментов в приводах (сами выражения громоздки и поэтому здесь не приведены, но графики движущих моментов для управления в виде (2) показаны на **Рис.4**).

График кинетической энергии как функции времени изображен на **Рис.5**.

Работа, затраченная на движение, полученное согласно критерию, основанном на минимуме «нормы мощности» $A_1 = 5,67$ Дж. Численное значение принципа действия (1) для этого управления $J_1 = 1,87$ Дж·с.

2. Вторая форма движения. Рассмотрено движение манипулятора, при котором первое звено совершает вращательное движение, а второе и третье звенья совместно участвуют в плоскопараллельном движении (**Рис.6**).

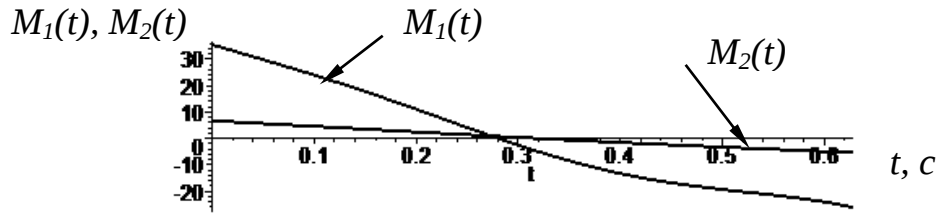


Рис.4 – Движущие моменты в приводах

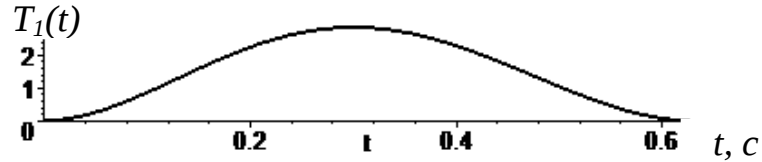


Рис.5 – График изменения кинетической энергии

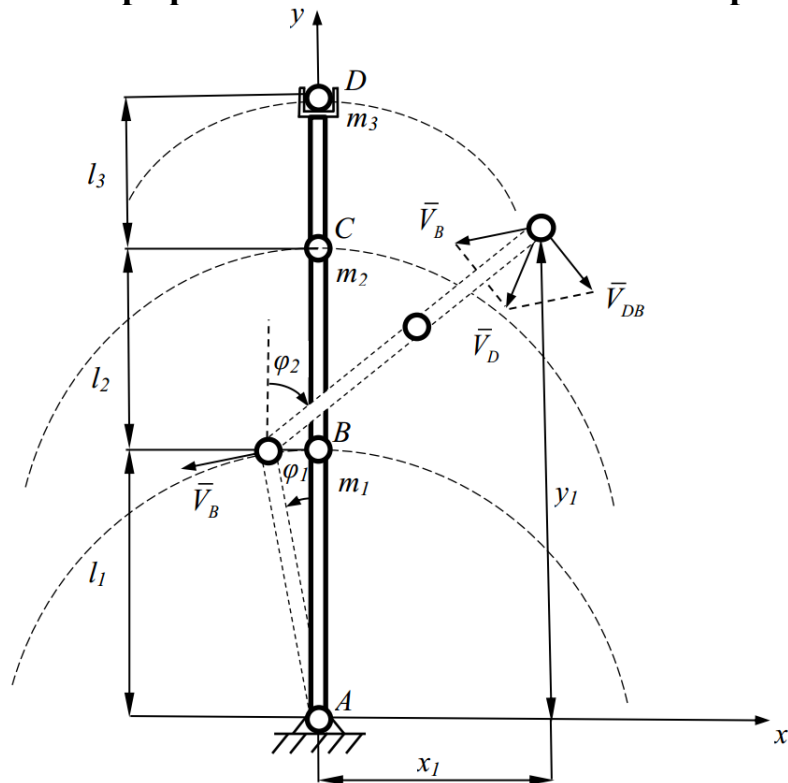


Рис.6 – Схема движения (вторая форма движения)

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

$$\begin{aligned} -l_1 \sin(\varphi_1^*) + (l_2 + l_3) \sin(\varphi_2^*) - x_1 &= 0, \\ l_1 \cos(\varphi_1^*) + (l_2 + l_3) \cos(\varphi_2^*) - y_1 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение системы уравнений (5) приводит к следующим значениям углов: $\varphi_1^* = 0,128$ ($7,31^\circ$); $\varphi_2^* = 0,851$ ($48,75^\circ$). Кинетическая энергия вычисляется так:

$$T_2 = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + l_2^2 \dot{\varphi}_2^2 + 2 l_1 \dot{\varphi}_1 l_2 \dot{\varphi}_2 \cos(\pi - (\varphi_1 + \varphi_2)) \right) + \frac{1}{2} m_3 \left(l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + (l_2 + l_3)^2 \dot{\varphi}_2^2 + 2 l_1 \dot{\varphi}_1 (l_2 + l_3) \dot{\varphi}_2 \cos(\pi - (\varphi_1 + \varphi_2)) \right).$$

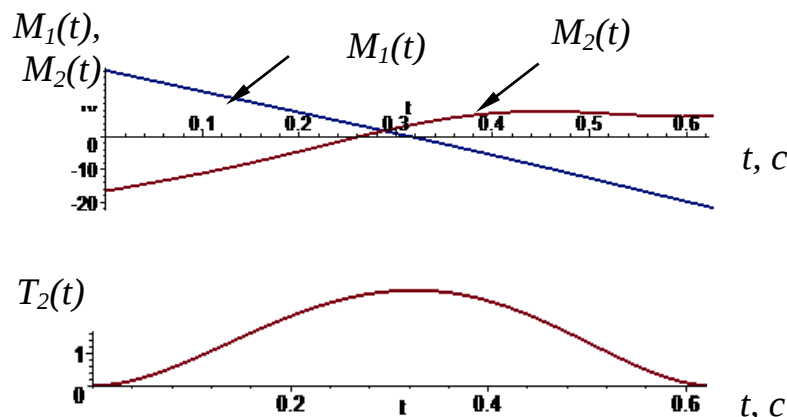


Рис.7 – Движущие моменты в приводах и график изменения кинетической энергии для второй формы движения

Найдены моменты (**Рис.7**) в приводах и их работа, затраченная на движение, $A_2 = 5,91$ Дж. Значение принципа действия (1) для этой формы движения $J_2 = 1,99$ Дж·с.

3. Третья форма движения. Рассмотрено движение манипулятора, при котором первое звено вращается, а второе и третье звенья участвуют в плоскопараллельном движении (**Рис. 8**). Для данной формы движения система трансцендентных уравнений (для определения φ_1^* , φ_2^* , соответствующих этой форме) имеет вид:

$$\begin{aligned} -l_1 \sin(\varphi_1^*) - l_2 \sin(\varphi_2^*) + l_3 \sin(\varphi_3^*) + x_1 &= 0, \\ l_1 \cos(\varphi_1^*) + l_2 \cos(\varphi_2^*) + l_3 \cos(\varphi_3^*) - y_1 &= 0, \\ l_1 \cos(\varphi_1^*) + l_2 \cos(\varphi_2^*) - y_2 &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где y_2 – ордината точки *C* (**Рис.8**). Численное решение системы уравнений (6) дает значения конечных углов: $\varphi_1^* = 0,454$ ($26,11^\circ$); $\varphi_2^* = 1,012$ ($57,95^\circ$); $\varphi_3^* = 0,436$ ($25,07^\circ$).

Кинетическая энергия в том случае равна

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + l_2^2 \dot{\varphi}_2^2 + 2 l_1 \dot{\varphi}_1 l_2 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \right) + \\ &+ \frac{1}{2} m_3 \left(\left(l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + l_2^2 \dot{\varphi}_2^2 + 2 l_1 \dot{\varphi}_1 l_2 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \right)^2 + l_3^2 \dot{\varphi}_3^2 \right) + \\ &+ \frac{1}{2} m_3 \left(2 l_3 \varphi_3 \left(l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + l_2^2 \dot{\varphi}_2^2 + 2 l_1 \dot{\varphi}_1 l_2 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \right) \cos \alpha \right), \end{aligned}$$

где $\alpha = \pi - \varphi_3 - \frac{\varphi_2}{2} - \frac{\varphi_1}{2}$.

Моменты в приводах находятся аналогично.

Работа, затраченная на реализацию движения, $A_3 = 29,67$ Дж. Значение принципа действия (1) для третьей формы движения $J_3 = 4,88$ Дж·с.

Для обоснованного выбора приемлемой формы движения (из рассмотренных в статье), помимо вычисления работы, затраченной на реализацию движения, и принципа действия для каждой из форм движения также был вычислен «обобщенный мультипликативный критерий энергодействия» [11]. Результаты представлены в таблице 1, из которой следует, что все критерии принимают минимальное значение для первой формы движения; она является предпочтительной.

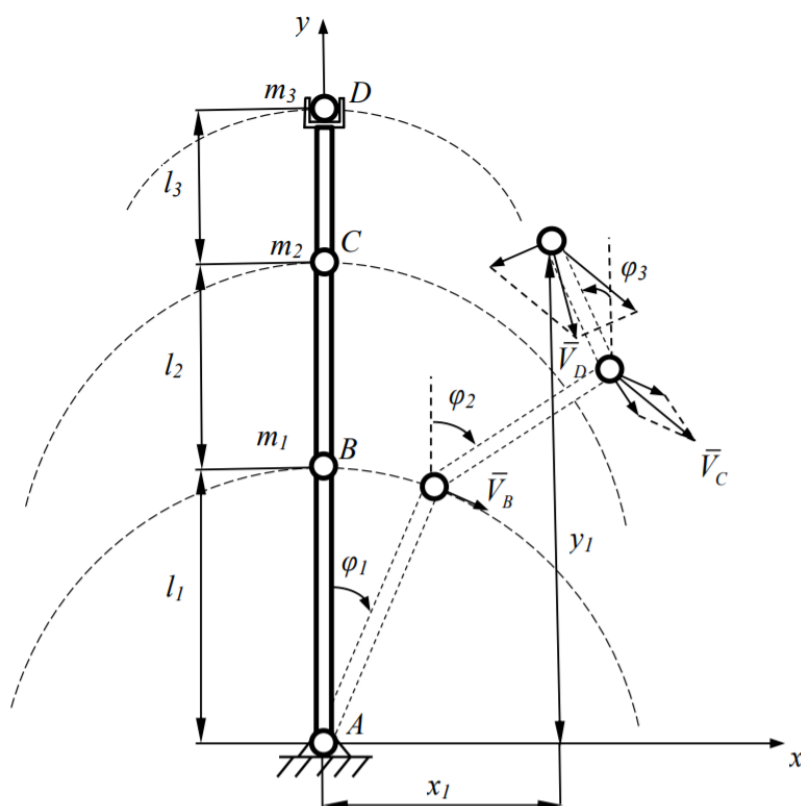


Рис.8 – Схема движения (третья форма движения)

Для рассмотренных форм движения также вычислены значения критериев с учетом управления в виде гармонической функции (3). Результаты приведены в таблице 2.

Графики движущих моментов (для первой формы движения) изображены на **Рис.9**.

Данные таблиц 1 и 2 свидетельствуют, что применение управления (2) дает менее энергоемкий вариант.

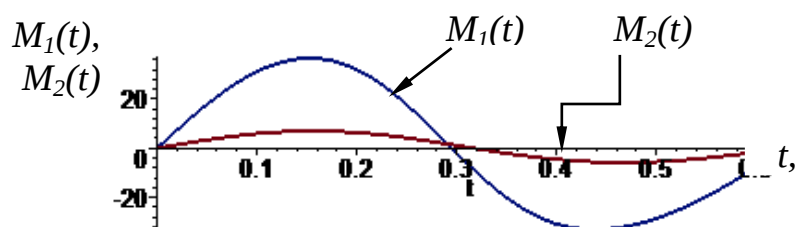
Графики движущих моментов (**Рис.4,5,7,9**) и экстремум кинетической энергии подтверждают кососимметричный характер оптимальных управлений движения и предпочтение первой формы движения.

Таблица 1. – Значения критериев для управления по норме мощности

Формы движения, конечные углы	Энергия A , Дж	Действие J , Дж·с	Энергодействие $\mathcal{E}D = A \cdot J$, Дж ² ·с	Примечание
Первая форма $\varphi_1^* = 11,02^\circ, \varphi_3^* = 79,75^\circ$	5,67	1,87	10,60	Предпочтительная форма
Вторая форма $\varphi_1^* = 7,31^\circ, \varphi_2^* = 45,75^\circ$	5,91	1,99	11,76	
Третья форма $\varphi_1^* = 26,11^\circ, \varphi_2^* = 57,95^\circ$ $\varphi_3^* = 25,07^\circ$	29,67	4,88	144,79	

Таблица 2. – Значения критериев для управления в виде гармонической функции

Формы движения, конечные углы	Энергия A , Дж	Действие J , Дж·с	Энергодействие $\mathcal{E}D = A \cdot J$, Дж ² ·с	Примечание
Первая форма $\varphi_1^* = 11^\circ, \varphi_2^* = 79,75^\circ$	10,08	2,34	23,59	Предпочтительная форма
Вторая форма $\varphi_1^* = 7,31^\circ, \varphi_2^* = 45,75^\circ$	12,15	2,42	29,403	
Третья форма $\varphi_1^* = 26,11^\circ, \varphi_2^* = 57,95^\circ$ $\varphi_3^* = 25,07^\circ$	68,54	6,13	420,15	

**Рис.9** – Движущие моменты в приводах для первой формы движения и управления вида (3)

Выводы. Предложена методика поиска формы движения трехзвенного манипулятора, позволяющая для заданного начального и конечного положения руки найти форму движения, соответствующую минимальной энергоемкости.

Алгоритм поиска форм движения руки применим при выборе оптимального закона управления из найденных ранее в работах [4, 8, 9] с использованием методики реверсионного конструирования кососимметричных управлений.

Данный подход при выборе форм движения предполагает учет конечной изгибной жесткости звеньев и их массу, распределенную по длине.

Библиографический список

1. Булгаков А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев. – М.: Солон-Пресс, 2007. – 488 с.
2. Khalil W. Modelling, Identification and Control of Robots / W.Khalil, E.Dombre. – London: Hermes Penton Ltd, 2002.
3. Spong M.W. Robot Modelling and Control / M.W.Spong, S.Hutchinson, M.Vidyasagar. – New York: Wiley, 2006.
4. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212с.
5. Бохонский А.И. Оптимальное управление движением упругого антропоморфного манипулятора / А.И. Бохонский, Д.В. Волнухин // Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология. – Севастополь: СевГТУ, 1997. – Вып.6. – С. 28 – 32.
6. Теория автоматического управления. Ч.II. Теория нелинейных специальных систем автоматического управления. Под ред. А.А. Воронова. М.: Высшая школа, 1997. – 288 с.
7. Солодовников В.В. Основы теории и элементов систем автоматического регулирования: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
8. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
9. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления. – Rabmarium Academic Publishing, 2013. – 77 с.
10. Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Механика, автоматика и робототехника. Материалы междунар. науч.-техн.конф.–Новокузнецк: НИЦ МС, 2017.–С.64-69
11. Бохонский А.И. Формы движения антропоморфного манипулятора / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2019. – Issue 14. Vol.1. – P. 58 – 63.

Bibliograficheskiy spisok

1. Bulgakov A.G. Promyshlennyye roboty. Kinematika, dinamika, kontrol' i upravlenie / A.G. Bulgakov, V.A. Vorob'ev. – М.: Solon-Press, 2007. – 488 s.
2. Khalil W. Modelling, Identification and Control of Robots / W.Khalil, E.Dombre. – London: Hermes Penton Ltd, 2002.
3. Spong M.W. Robot Modelling and Control / M.W.Spong, S.Hutchinson, M.Vidyasagar. – New York: Wiley, 2006.
4. Bohonskiy A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischisleniya v mekhanike / A.I. Bohonskiy, N.I. Varminskaya. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 212s.
5. Bohonskiy A.I. Optimal'noe upravlenie dvizheniem uprugogo antropomorfnogo manipulyatora / A.I. Bohonskiy, D.V. Volnuhin // Vestnik SevGTU. Mekhanika, energetika, ekologiya. – Sevastopol': SevGTU, 1997. – Vyp.6. – С. 28 – 32.

6. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. CH.II. Teoriya nelinejnyh special'nyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A.A. Voronova. M.: Vysshaya shkola, 1997. – 288 s.
7. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementov sistem avtomaticheskogo regulirovaniya: ucheb. posobie. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 536 s.
8. Bohonskij A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti. – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2016. – 174 s.
9. Bohonskij A.I. Aktual'nye zadachi variacionnogo ischisleniya. – Pabmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
10. Bohonskij A.I. Konstruirovaniye upravlyaemogo dvizheniya ob"ektov / A.I. Bohonskij, A.I. Ryzhkov // Mekhanika, avtomatika i robototekhnika. Materialy mezhdunar. nauch.-tekhn.konf. – Novokuzneck: NIC MS, 2017. – S. 64 – 69.
11. Bohonskij A.I. Formy dvizheniya antropomorfnoho manipulyatora / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2019. – Issue 14. Vol.1. – P.58–63.

Варминская Наталья Ивановна, канд. техн. наук, доц., nvarminska@gmail.com, Россия, г. Севастополь, Черноморское высшее военноморской училище им. П.С. Нахимова.

ANALYSIS OF MOTION FORMS OF ANTHROPOMORPHOUS MANIPULATOR

Varminskaya N.I.

A model of motion optimal control for an anthropomorphous three-link manipulator with weightless links and concentrated masses at joints is proposed. Using the energy criterion, the action principle and the energy intensity criterion the preferable motion form is identified, for which the achievement of a motion aim leads to decreasing of the energy costs for its implementation.

Key words. Optimal motion, action principle, motion form, energy intensity.

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

УСЛОВИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА С ПОСТОЯННОЙ МАССОЙ МЕЖДУ ВАЛКОВОЙ ПАРОЙ

Бахадиров Г.А.¹, Мусиров М.У.², Набиев А.М.³

Аннотация. Работа посвящена изучению условий захвата и втягивания листового материала между вращающимися валами, а также определению факторов, описывающих деформированного состояния листового материала (на примере кожи) между вращающимися валами. Рассмотрены параметры, характеризующие деформационные свойства обрабатываемого материала. Разработана математическая модель по определению величин деформации и напряжения в очаге деформации листового материала, перемещающегося между вращающимися валами.

Ключевые слова. Листовой материал, масса, толщина, движение, деформация, валковая пара, внешние силы, внутренние силы.

Условия деформирования материалов с различной структурой исследованы в работах [1,2,3,4]. Движение листового материала с переменной массой зажатого между вращающимися валами, а также особенности технологического процесса подачи и деформации обрабатываемого материала рассмотрены нами в работах [5,6,7].

Теперь рассмотрим условия и геометрические характеристики очага деформации листового материала с постоянной массой, например, кожи.

Уравнение движения листового материала по направлению оси x запишем в следующем виде

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = P(s + \Delta s) - P(s) + F_{\text{тр}1} \text{dscos}\alpha_1 + F_{\text{тр}2} \text{dscos}\alpha_2 - N_1 \text{dssin}\alpha_1 - N_2 \text{dssin}\alpha_2 - F \text{ds}. \quad (1)$$

Где, $m = \rho \text{ds}\Delta x$ – масса выделенного участка листового материала;

$\Phi = -m \frac{d^2x}{dt^2}$ – сила инерции действующая на выделенный участок листового материала;

$P(s)$ – внутреннее напряжение на расстоянии s листового материала;

$P(s + \Delta s)$ – внутреннее напряжение на расстоянии $s + \Delta s$ листового материала;

$F_{\text{тр}1}$ и $F_{\text{тр}2}$ – силы трения в зоне контакта вращающихся валов с листовым материалом;

N_1 и N_2 – нормальные силы реакции в зоне контакта между вращающимися валами и листовым материалом;

F – сила сопротивления движению листового материала.

$$-\Phi = \frac{\partial P(s)}{\partial s} + F_{\text{тр}1} \text{cos}\alpha_1 + F_{\text{тр}2} \text{cos}\alpha_2 - N_1 \text{sin}\alpha_1 - N_2 \text{sin}\alpha_2 - F. \quad (2)$$

$$\frac{\partial P(s)}{\partial s} = 2N \sin \alpha - 2F_{\text{тр}} \cos \alpha + F - \Phi. \quad (3)$$

Используя уравнение Коши и закон Гука, получаем следующее

$$P = E \frac{du}{ds}, \quad (4)$$

где, u – перемещение внутренних частиц в деформируемой зоне листового материала.

Используя закон Кулона, определяем силу трения

$$F_{\text{тр}} = fN. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в уравнение (3) получим следующее

$$\frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = \frac{1}{E} (2N(\sin \alpha - f \cos \alpha) + F - \Phi), \quad (6)$$

$$N = \frac{Q}{\cos \alpha}, \quad (7)$$

где Q – сила тяжести верхнего вращающегося вала.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = \frac{1}{E} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi). \quad (8)$$

Далее интегрируя дифференциальное уравнение (8) определяем деформацию листового материала

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial s} = \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{E} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) ds + C. \quad (9)$$

Подставляя (9) в уравнение (4) определяем напряжение.

$$P = \int_{s_1}^{s_2} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) ds + C_1, \quad (10)$$

$$\varepsilon_x = \int_{x_0}^{x_1} \frac{1}{E} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) dx,$$

$$\varepsilon_y = \int_{y_0}^{y_1} \frac{1}{E} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) dy.$$

Если $\frac{1}{E} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) = \text{const}$ будет неизменным значением, то используя граничные условия, произведем следующие вычисления для участка на входе листового материала между валковой парой.

$$\{x_0 = -R \sin \phi, |$$

$$\{y_0 = R \cos \phi, |$$

$$\varepsilon_x = \frac{R}{E} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) \sin \phi,$$

$$\varepsilon_y = \frac{R}{E} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) (1 - \cos \phi),$$

$$\varepsilon_l = \frac{2R}{E} (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) \sin \frac{\phi}{2},$$

$$\sigma_l = 2R (2Q(\tan \alpha - f) + F - \Phi) \sin \frac{\phi}{2}.$$

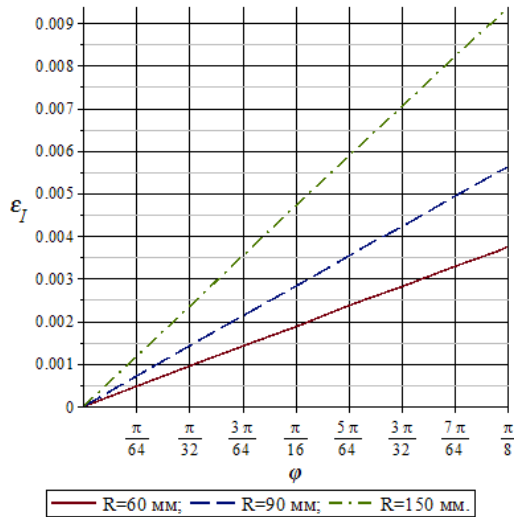


Рис.1 – Изменение деформации листового материала ε_I в зависимости от угла захвата валков φ (на входе между валковой парой)

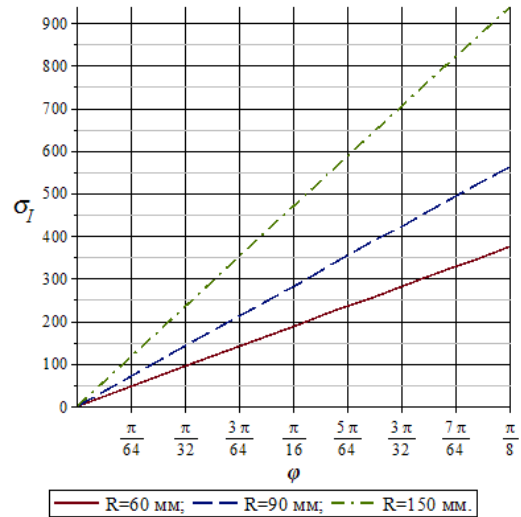


Рис.2 – Изменение напряжения σ_I в зависимости от угла захвата валков φ (на входе между валковой парой)

Теперь произведем вычисления для участка на выходе листового материала между валковой парой.

$$\begin{aligned} \{x_0 = 0, | \\ \{y_0 = R, | \\ \varepsilon_{II} = \frac{2R}{E} (2Q(\operatorname{tg}\alpha - f) + F - \Phi) \sin \frac{\psi}{2}, \\ \sigma_{II} = 2R(2Q(\operatorname{tg}\alpha - f) + F - \Phi) \sin \frac{\psi}{2}. \end{aligned}$$

Общие результаты: $\psi = \theta - \varphi$.

Разница между деформациями листового материала на входе и выходе между валковой парой означает остаточную деформацию.

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_I - \varepsilon_{II} = \frac{2R}{E} (2Q(\operatorname{tg}\alpha - f) + F - \Phi) \left(\sin \frac{\theta - \psi}{2} - \sin \frac{\psi}{2} \right).$$

Разницу между напряжениями на входе и выходе между валковой парой, которые вызывают остаточную деформацию запишем в следующем виде.

$$\Delta\sigma = \sigma_I - \sigma_{II} = 2R(2Q(\operatorname{tg}\alpha - f) + F - \Phi) \left(\sin \frac{\theta - \psi}{2} - \sin \frac{\psi}{2} \right).$$

Получена математическая модель для определения деформации и напряжения в очаге деформации листового материала, перемещающегося между вращающимися валами.

Определено изменение деформации листового материала ε_I в зависимости от угла захвата валков φ (на входе между валковой парой). Определено изменение напряжения σ_I в зависимости от угла захвата валков φ (на входе между валковой парой).

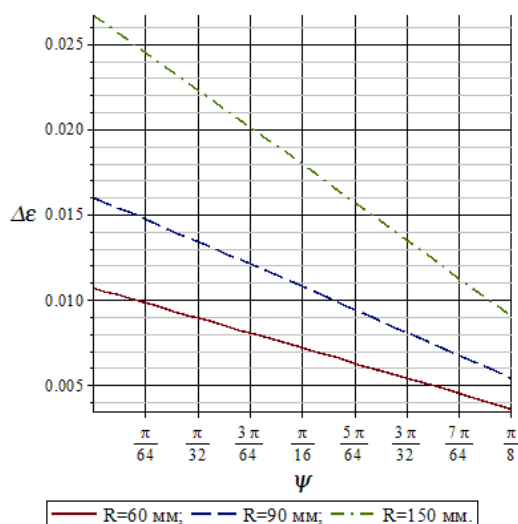


Рис.3 – Изменение остаточной деформации $\Delta\epsilon$ в зависимости угла захвата валков ψ (на выходе между валковой парой)

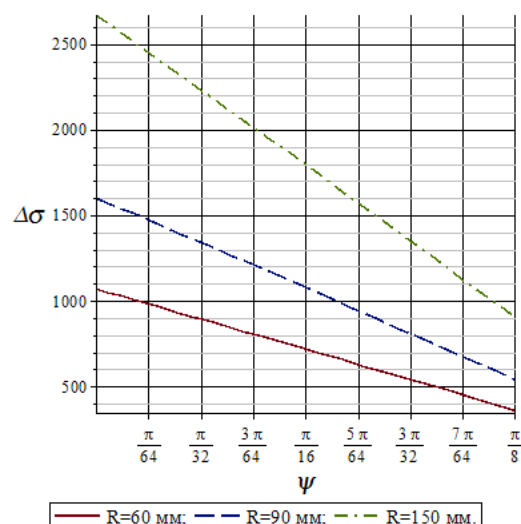


Рис.4 – Изменение напряжения $\Delta\sigma$ в зависимости угла захвата валков ψ (на выходе между валковой парой)

Определено изменение остаточной деформации $\Delta\epsilon$ в зависимости угла захвата валков ψ (на выходе между валковой парой). Определено изменение напряжения $\Delta\sigma$ в зависимости угла захвата валков ψ (на выходе между валковой парой), см. **Рис.1, Рис.2, Рис.3, Рис.4.**

Итак, нами изучены условия захвата и выявлены факторы, описывающие деформированное состояние листового материала (на примере кожи) между вращающимися валами. Определен закон втягивания и горизонтального движения листового материала в валковом модуле, верхний и нижний валы которого вращаются с постоянной скоростью.

Полученные результаты будут использованы в проектировании новых конструкций технологических машин, а также в определении и выборе параметров и условий деформирования листовых материалов между валковой парой в инженерных расчетах и экспериментальных исследованиях.

Библиографический список

1. Соколовский, А.Р. Развитие методов и совершенствование средств исследования физико-механических свойств волокнисто-пористых материалов легкой промышленности: дис. ... докт. техн. наук: / А.Р.Соколовский. – М.: 2010. – 287 с.
2. Дорохов, Д.О. Управляемое градиентное упрочнение осесимметричных изделий комплексным локальным нагружением очага деформации: дисс. ... докт. техн. наук: / Д.О. Дорохов. – Орел: 2018. – 283 с.
3. Minton, J.J. Mathematical modelling of asymmetrical metal rolling processes / J.J. Minton // ISPC Results and Perspectives. – 2017. – Harrisburg, USA. – P. 5.
4. Владыкин, Н.Г. Реологическая модель материала с волнистой структурой волокон / Н.Г. Владыкин // Инженерный вестник. Изд. ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». – 2015. – №5. – С. 38–42.
5. Бахадиров, Г.А. Математическая модель движения листового материала,

зажатого между вращающимися валками / Г.А. Бахадиров, М.У. Мусиров, А.М. Набиев // Международный академический вестник. – 2018. – №10 (30). – С. 28-30.

6. Бахадиров, Г.А. Разработка устройства ориентированной подачи кожевенного полуфабриката в зону обработки / М.У. Мусиров // Матер. докл. 49 межд. науч.-техн. конф. препод. и студ. Витебск, 1 сент. 2016 г. – Витебск: В 2 т. Т. 2 / УО «ВГТУ», 2016. – С. 191–193.

7. Бахадиров, Г.А., К определению формы направляющей поверхности устройства подачи плоского материала в зону обработки / А.М. Набиев, М.У. Мусиров // Матер. XXVI межд. науч.-техн. конф. «Прикладные задачи математики». Севастополь, 17–21 сент. 2018 г. – Севастополь: 2018. – С. 49–52.

Bibliograficheskiy spisok

1. Sokolovskiy. A.R. Razvitiye metodov i sovershenstvovaniye sredstv issledovaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv voloknistoporistikh materialov legkoy promyshlennosti: dis. ... dokt. tekhn. nauk: / A.R.Sokolovskiy. – M.: 2010. – 287 s.

2. Dorokhov. D.O. Upravlyayemoye gradiyentnoye uprochneniye osesimmetrichnykh izdeliy kompleksnym lokalnym nagruzheniyem ochaga deformatsii: diss. ... dokt. tekhn. nauk: / D.O. Dorokhov. – Orel: 2018. – 283 s.

3. Minton. J.J. Mathematical modelling of asymmetrical metal rolling processes / J.J. Minton // ISPC Results and Perspectives. – 2017. – Harrisburg, USA. – P. 5.

4. Vladykin. N.G. Reologicheskaya model materiala s volnistoy strukturoy volokon / N.G. Vladykin // Inzhenernyy vestnik. Izd. FGBOU VPO «MGU im. N.E. Bauman». – 2015. – №5. – S. 38–42.5.

Bakhadirov. G.A. Matematicheskaya model dvizheniya listovogo materiala. zazhatogo mezhdu vrashchayushchimisya valkami / G.A. Bakhadirov. M.U. Musirov. A.M. Nabyev // Mezhdunarodnyy akademicheskyy vestnik. – 2018. – №10 (30). – S. 28-30.

6. Bakhadirov. G.A. Razrabotka ustroystva oriyentirovannoy podachi kozhevennogo polufabrikata v zonu obrabotki / M.U. Musirov // Mater. dokl. 49 mezhd. nauch.-tekhn. konf. prepod. i stud. Vitebsk. 1 sent. 2016 g. – Vitebsk: V 2 t. T. 2 / UO «VGTU». 2016. – S. 191–193.

7. Bakhadirov. G.A.. K opredeleniyu formy napravlyayushchey poverkhnosti ustroystva podachi ploskogo materiala v zonu obrabotki / A.M. Nabyev. M.U. Musirov // Mater. XXVI mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Prikladnyye zadachi matematiki». Sevastopol. 17–21 sent. 2018 g. – Sevastopol: 2018. – S. 49–52.

Бахадиров Гайрат Атаханович, д-р техн. наук, проф., гл. научн. сотр., instmech@rambler.ru, Узбекистан, Ташкент, Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан (ул. Дурмон йули 31, г. Ташкент, 100125, Узбекистан)

Мусиров Махмаражаб Уралович, младший научн. сотр., musirov.mech.1992@mail.ru, Узбекистан, Ташкент, Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан (ул. Дурмон йули 31, г. Ташкент, 100125, Узбекистан).

Набиев Айдер Мустафаевич, младший научн. сотр., a.nabiev@mail.ru, Узбекистан, Ташкент, Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан (ул. Дурмон йули 31, г. Ташкент, 100125, Узбекистан).

CONDITIONS OF DEFORMATION OF SHEET MATERIAL WITH A CONSTANT MASS BETWEEN THE ROLLS

G. A. Bahadirov, M. U. Musirov, A. M. Nabiev

The work is devoted to the study of the conditions of capture and intake of sheet material between rotating shafts, as well as the determination of factors describing the deformed state of sheet material (for example, leather) between rotating rollers. The parameters characterizing the deformation properties of the material being processed are considered. A mathematical model is described to determine the values of strain and stress in the deformation zone of sheet material moving between rotating rollers.

Key words: sheet material, mass, thickness, movement, deformation, roller pair, external forces, internal forces.

Bahadirov Gayrat Atahanovich, doctor of technical sciences, professor, Ch. scientific staff, instmech@rambler.ru, Uzbekistan, Tashkent, Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after Urazbaev, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Durmon Yuli street, 31, Tashkent, 100125, Uzbekistan).

Musirov Makhmarazhab Uralovich, junior scientific, instmech@rambler.ru, Uzbekistan, Tashkent, Institute of Mechanics and Seismic Resistance of Structures named after M.T. Urazbayeva of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (31 Durmon Yuli, Tashkent, 100125, Uzbekistan).

Nabiev Ayder Mustafaevich, junior scientific, instmech@rambler.ru, Uzbekistan, Tashkent, Institute of Mechanics and Seismic Resistance of Structures named after M.T. Urazbayeva of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (31 Durmon Yuli, Tashkent, 100125, Uzbekistan).

УДК 004:54

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ В СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Доронина Ю.В.¹

Аннотация. Рассматриваются проблемы моделирования сложных многокомпонентных технических систем, связанные с нефункционально избыточными процессами описания, что порождает трудоемкость исследования и невозможность учета изменчивости их параметров. Укрупнение компонентного состава технических систем обуславливает возможные потери информации при описании каждого элемента, связанные с анализом значимости элемента и его связей с другими элементами, в том числе граничными. Предложен агрегированный подход, учитывающий как степень уникальности системных компонент, так и изменение их значимости. Предложено учитывать степень включенности компонента в систему и меру перекрестных включений элементов с целью уточнения решений по управлению функционированием сложных технических систем на основе укрупненных моделей.

Ключевые слова. Многокомпонентная система, деградация системы, включенность компонента, значимости элементов, значимости связей, укрупнение модели.

Введение. При моделировании и исследовании процессов функционирования сложных технических систем (СТО) принципиально важно учитывать взаимосвязи между их компонентами в процессе укрупнения состояний. Укрупнение состояний осуществляется вследствие большого числа компонент, что снижает сложность исследования, но повышает неопределенность, связанную с потерей некоторых показателей.

Особенно важным представляется учет типов связей между компонентами СТО. Кроме того, значимость связей и значимость самих компонент в системе могут быть несоизмеримы и нестационарны. Несоизмеримость отражается либо в несоответствии шкал измерений, либо в значительном разбросе значений по однородной шкале. Например, наработка на отказ технической системы может достигать сотни часов, а среднее время реализации одной операции – нескольких миллисекунд. Нестационарность в данном случае связана с изменением показателей (значимостей или весов компонент) во времени. В целом, в существующих подходах не рассматриваются веса элементов, их связей совместно и не учитываются изменение весов и связей при переходе типа элемента от граничного к внутреннему вследствие укрупнения системных компонент, связанных с состояниями.

Обзор исследований. Уменьшение числа состояний не должно приводить к потере точности выходных характеристик системы. При вычислении приближенных значений этих характеристик должны оцениваться погрешности, что усложняет математическую модель [1]. В известных источниках предложены принципы фазового укрупнения, сущность которого заключается в том, что фазовое пространство исходной системы расщепляется на конечное число непересекающихся классов. Состояния каждого класса «склеиваются» в одно состояние, а вероятности исходных состояний суммируются. В новом, укрупнённом фазовом пространстве строится укрупнённая система [2]. Данный подход основан на асимптотических методах. Это дает возможность получить приближенные значения выходных характеристик исходной системы.

В [1] рассмотрены различные способы укрупнения и указывается, что в отличие от существующих, авторский метод заключается в том, что состояния укрупнённой системы описываются такими же характеристиками, как и исходная, то есть обеспечивается изоморфизм исходной и укрупнённой системы, в том числе укрупнённая система сохраняет свойство марковости. Там же рассмотрена идея об укрупнении состояний по функциональному признаку, то есть по функциям, выполняемым системой в каждом состоянии.

Задачи анализа значимости элементов в большинстве случаев связаны с определением методических и вычислительных аспектов техногенных рисков системного функционирования в рамках прикладных предметных областей [3].

Представленный в работе [4] метод оценки весовых коэффициентов организационно - технических систем предполагает вычисление значений целевой функции системы без каждого элемента поочередно. Строится кортеж полученных значений целевой функции системы $F = \langle f_1 \dots f_s \dots f_S \rangle$, где f_s – значение показателя целевой функции при исключенном s -м элементе. Значение перераспределенного одинакового для всех оставшихся элементов системы усредненного весового коэффициента вычисляется как $w^* = 1/(S - 1)$. Далее предлагается вычисление кортежа реальных весовых коэффициентов элементов W следующим образом:

$$W_s = \frac{f_0 - f_k}{\sum_{k=1}^S (f_0 - f_k)}.$$

Предполагается, что этот подход сократит объем экспертных оценок.

Таким образом, существующие исследования, в большинстве своем не акцентируют внимания на нестационарности весовых функций, определяющих значимость компонента (ЗК) или его связи (ЗС) с другими компонентами СТО. Кроме того, при укрупнении многокомпонентных систем может измениться значимость граничных элементов и их связей вследствие формирования нового фазового пространства.

Проблематика исследования при моделировании процессов функционирования технических систем может быть представлена схематически, **Рис.1.**

На основании опыта исследователей и приведенного краткого обзора можно сделать следующие выводы:

1. Современные технические системы в большинстве случаев многокомпонентны, разнотипны как по компонентам, так и по связям между компонентами;
2. Наиболее распространенными являются методы моделирования, основанные на укрупнении компонентного состава СТО;
3. При укрупнении компонентного состава СТО возникают проблемы изменчивости значимостей (весов) как компонент, так связей между компонентами;
4. При исследовании функционирования СТО в рамках их жизненных циклов (ЖЦ) наиболее распространенной является задача изучения процессов деградации как СТО в целом, так и их компонент в частности;
5. При исследовании изменчивости значимостей (весов) как компонент, так связей между компонентами вследствие нестационарности параметров СТО целесообразно уточнять параметры граничных элементов новых укрупненных компонент.
6. Изменчивость ЗК и ЗС может быть следствием как деградиационных процессов СТО в целом, так и процесса укрупнения ее модели в частности.
7. Учет изменчивости ЗК и ЗС рассматривался в существующих исследованиях либо без учета нестационарности весовых функций, либо без взаимного влияния ЗК и ЗС, что порождало необходимость дополнительного решения ЛПР.

Цель исследования: моделирование изменчивости взаимосвязей элементов в СТО путем учета степени включенности компонента в систему и меры перекрестных включений компонентов с целью уточнения решений по управлению функционированием СТО на основе укрупненных моделей.

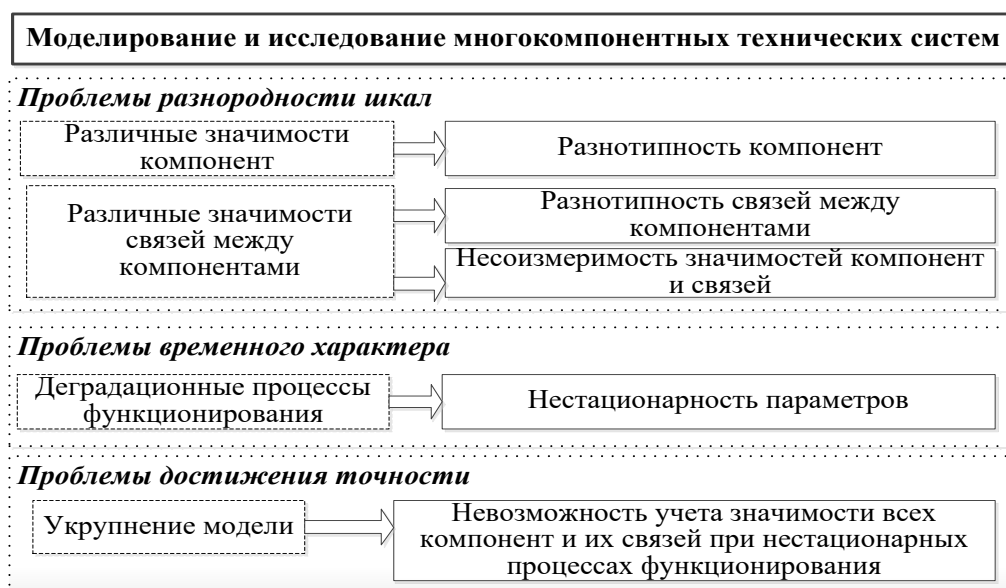


Рис.1 – Проблематика исследования при моделировании процессов функционирования технических систем

Постановка задачи. Пусть s_i и s_j – некоторые компоненты системы S с весами (значимостями) w_i и w_j соответственно; l_{ij} и l_{ji} – вид связи между компонентами s_i, s_j и их веса w_{ij} и w_{ji} соответственно. Тогда, система в общем случае может быть описана следующим образом:

$$S : \langle s_i | w_i, s_j | w_j, l_{ij} | w_{ij}, l_{ji} | w_{ji} \rangle, \quad (1)$$

Веса, как самих элементов, так и их связей могут зависеть от рассматриваемого периода времени (например, при деградации системы связи между ее компонентами могут утрачивать свою значимость). В этом случае для некоторого $t_k \in T$ выражение (1) примет вид:

$$S : \langle s_i(t_k, w_{ik}(t_k)), s_j(t_k, w_{jk}(t_k)), l_{ij}(t_k, w_{ijk}(t_k)), l_{ji}(t_k, w_{jik}(t_k)) \rangle. \quad (2)$$

Для системообразующих s_i их веса могут быть фиксированы [5]. Вид изменчивости весовых функций может иметь как детерминированный, так и стохастический характер, поэтому, при решении практических задач, ЛПР необходимо учитывать параметры соответствующих распределений.

Выражение для степени включенности компонента в систему с учетом (2) в некотором упрощении может быть записано как

$$u_{s_i}(t) = \left(\sum_{i=1}^N w_i^{out}(t) \sum_{j=1}^M w_{ij}^{out}(t) \right) / \left(\sum_{l=1}^L w_l^{in}(t) \sum_{h=1}^H w_{hl}^{in}(t) \right), \quad (3)$$

где N, M, L, H – мощности множеств внешних (out) и внутренних (in) компонент S , внешних и внутренних связей соответственно относительно компонента s_i .

Меру включения компонента s_j в s_i как нормированного числа пересечений их свойств в [6] предложено оценивать следующим образом:

$$W(s_i, s_j) = m(s_i \cap s_j) / m(s_i). \quad (4)$$

В рассматриваемом случае, (4) можно трактовать как нормированное число пересечений l_{ij} и l_{ji} с учетом w_{ij} и w_{ji} . Тогда (3) с учетом (4) примет вид:

$$u_{s_i}(t) = W(s_i, s_j) \left(\sum_{i=1}^N w_i^{out}(t) \sum_{j=1}^M w_{ij}^{out}(t) \right) / W(s_j, s_i) \left(\sum_{l=1}^L w_l^{in}(t) \sum_{h=1}^H w_{hl}^{in}(t) \right). \quad (5)$$

На **Рис.2** представлена схема СТО, на **Рис.3** граф состояний для Марковской модели в следующем фазовом пространстве состояний системы: $E = \{E0, E1, E2, E3, E4\}$, где $E0$ – рабочее состояние, $E1$ – состояние отказа, $E2$ – состояние восстановления системы после отказа, $E3$ – состояние профилактики (в модели не фиксируется – работает или простаивает система в момент профилактики), $E4$ – состояние сбоя – это состояние, из которого может быть осуществлен переход в состояние отказа, вслед за которым требуется восстановление, либо в начальное состояние без восстановления.

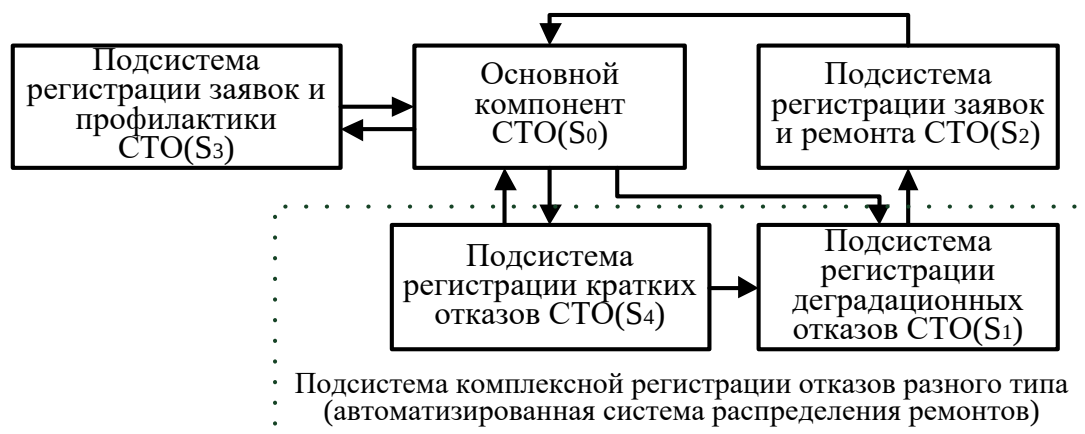


Рис.2 – Обобщенная схема СТО с укрупнением подсистем регистрации отказов разных типов

Приведенный пример иллюстрирует максимальное соответствие состояний Марковской модели и физических (информационных) компонентов СТО (Рис.2, Рис.3).

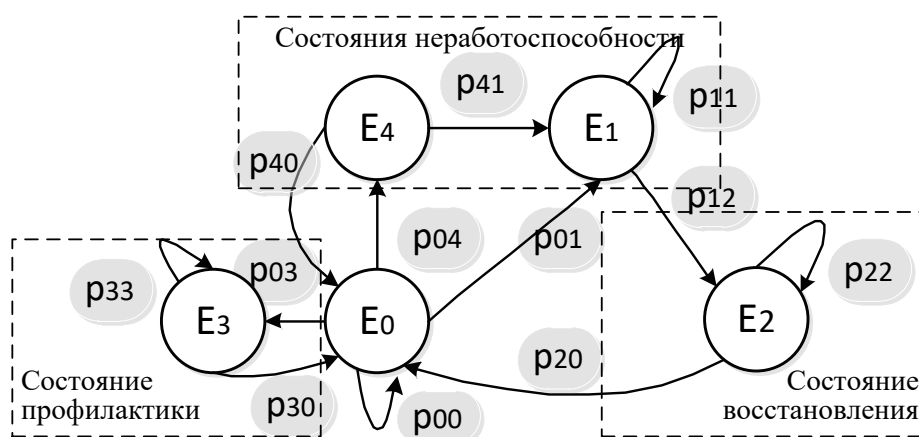


Рис.3 – Граф переходов Марковской модели СТО

При решении практической задачи, связанной с моделированием процесса функционирования СТО, очевидно, что на различных этапах ее функционирования $t_0 < t_1$, для s_1 и s_4 – до наступления деградации и после развития деградационных процессов веса s_1 и s_4 могут изменяться: $w_1(t_1) > w_1(t_0)$, $w_4(t_1) < w_4(t_0)$. Но для типов связей $l_{0,4}$, $l_{0,1}$ (переход в краткий отказ и переход в деградационный отказ соответственно) $w_{0,1}(t_0) < w_{0,4}(t_0)$, а в момент времени $t_0 < t_1$ изменить свой вес $w_{0,1}(t_0) > w_{0,1}(t_1)$, $w_{0,4}(t_0) < w_{0,4}(t_1)$.

Расчетные процедуры показали, что для некоторых параметров: $w_{1,2} = 0.3$, $w_{2,1} = 0.2$, $w_1(t_1) = 0.4$, $w_1(t_0) = 0.8$, $w_2(t_1) = 0.6$, $w_2(t_0) = 0.8$,

$w_{2,1}(t_0) = 0.4, w_{2,1}(t_1) = 0.9, w_{1,2}(t_0) = 0.5, w_{1,2}(t_1) = 0.3$ показатель $u_{s_i}(t)$ принимает значения $u_{s_4}(t_0) \approx 0.076, u_{s_4}(t_1) \approx 0.051$. Это означает, что степень включенности s_4 компонента в систему с учетом нормированного числа пересечений снижается для $t_0 < t_1$, то есть в момент начала деградационных процессов подсистема регистрации краткосрочных отказов, не требующих восстановления, поглощена подсистемой регистрации всех типов отказов, что связано с укрупнением этих состояний.

Заключение. Моделирование многокомпонентных систем в большинстве случаев связано с укрупнением как состояний, так и компонентов системы. Появление изменчивости ЗК и ЗС характерно для исследования функционирования СТО на протяжении ЖЦ, причем часто не рассматриваются веса элементов, их связей (ЗК и ЗС) совместно и не учитываются изменение ЗК и ЗС при переходе типа элемента от граничного к внутреннему вследствие укрупнения системных компонент, связанных с состояниями. Тенденция возможности получения численных оценок степени включенности компонента в систему в зависимости от времени, может служить дополнительной характеристикой системной динамики. Таким образом, решая задачу моделирования процесса деградации сложной системы в целом и применяя предложенный подход, возможно учесть как степень уникальности компонент системы, так и изменение значимости составляющих системы вследствие деградационных процессов, что позволит принимать обоснованное решение об укрупнении состояний системы, структурных компонент.

Дальнейшее развитие подхода связано с реализацией системы поддержки принятия решений (СППР) в области укрупнения состояний на основе моделирования изменчивости взаимосвязей элементов в СТО путем учета степени включенности компонента в систему и меры перекрестных включений компонентов. СППР позволит повысить эффективность структурно-функционального синтеза СТО.

Библиографический список

1. Зеленцов Б.П. Укрупнение состояний по функциональному признаку при расчете надежности оборудования систем коммутации / Б.П. Зеленцов // Анализ и моделирование сигналов и систем связи: Сб. науч. тр. учебных ин-тов связи. – СПб.: Изд. ЛЭИС, 1993. – С. 74–80.
2. Королюк В.С. Фазовое укрупнение сложных систем / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – Киев: Вища школа. – 1978. – 112 с.
3. Серебровский А.Н. Методические и вычислительные аспекты значимости риска компонентов сложных систем. Ч. I / А.Н. Серебровский // ММС. – 2012. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-i-vychislitelnye-aspekty-znachimosti-riska-komponentov-slozhnyh-sistem-ch-i> (дата обращения: 13.05.2019).
4. Бойко А. А. Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем / А.А. Бойко, И.С. Дегтярёв // Системы управления, связи и безопасности. 2018. №2. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/metod-otsenki-vesovykh-koeffitsientov-elementov-organizatsionno-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 14.05.2019).

5. Николаев, В.И. Системотехника: методы и приложения / В.И. Николаев, В.М. Брук. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. –1985. – 199 с.

6. Андрейчиков А.В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. –М.: Ф.и С., 2000.– 205 с

Bibliograficheskiy spisok

1. Zelentsov B.P. Ukrupneniye sostoyaniy po funktsionalnomu priznaku pri raschete nadezhnosti oborudovaniya sistem kommutatsii / B.P. Zelentsov // Analiz i modelirovaniye signalov i sistem svyazi: Sb. nauch. tr. uchebnykh in-tov svyazi. – SPB.: Izd. LEIS. 1993. – S. 74–80.

2. Korolyuk V.S. Fazovoye ukрупneniye slozhnykh sistsem / V.S. Korolyuk. A.F. Turbin. – Kiyev: Vishcha shkola. – 1978.– 112 s.

3. Serebrovskiy A. N. Metodicheskiye i vychislitelnyye aspekty znachimosti riska komponentov slozhnykh sistem. Ch. I / A.N. Serebrovskiy // MMS. – 2012. — №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-i-vychislitelnye-aspekty-znachimosti-riska-komponentov-slozhnykh-sistem-ch-i> (data obrashcheniya: 13.05.2019).

4. Boyko A. A. Metod otsenki vesovykh koeffitsiyentov elementov organizatsionno-tehnicheskikh sistem /A.A. Boyko // Sistemy upravleniya. svyazi i bezopasnosti. 2018. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-otsenki-vesovykh-koeffitsientov-elementov-organizatsionno-tehnicheskikh-sistem> (data obrashcheniya: 14.05.2019).

5. Nikolayev. V.I. Sistemotekhnika: metody i prilozheniya / V.I. Nikolayev. V.M. Bruk. – L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye. –1985. – 199 s.

6. Andreychikov A.V. Analiz. sintez. planirovaniye resheniy v ekonomike / A.V. Andreychikov. O.N. Andreychikova. –М.: F.i S.. 2000.– 205 s

Доронина Юлия Валентиновна, докт. техн. наук, доц., проф. кафедры juvado@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

MODELING THE VARIABILITY OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN ELEMENTS IN A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

Doronina Yu.V.

The problems of modeling complex multicomponent technical systems associated with non-functionally redundant description processes are considered, which generates the complexity of the study and the inability to take into account the variability of their parameters. Consolidation of the component composition of technical systems causes possible loss of information in the description of each element associated with the analysis of the importance of the element and its

relationships with other elements, including the boundary. An aggregated approach is proposed that takes into account both the degree of uniqueness of system components and changes in their significance. It is proposed to consider the degree of involvement of the component in the system and the extent of cross-inclusions of elements in order to clarify the management decisions for the functioning of difficult technical systems on the basis of the enlarged models.

Keyword: Multicomponent system, degradation of system involvement component, significance elements of the significance of relations, and integration of models.

Doronina Yulia Valentinovna, — Ph.D., Dr. Sci., Associate Professor, Professor, Department of information systems, Sevastopol state University juvado@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПИСАНИЙ СИСТЕМ НЕСВЯЗАННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ЗАДЕРЖКАМИ НАЧАЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Мезенцев Ю.А.¹

Аннотация. Представлены оригинальные постановка и алгоритм решения одной из ключевых задач теории расписаний и ряда ее модификаций. Рассматриваемая задача оптимального управления расписаниями параллельной системы заключается в таком составлении или регулировании расписаний, которое минимизирует длину расписания либо потери системы от нарушений заданных графиков обслуживания заявок приборами. Данная задача является NP – трудной и не имеет эффективных алгоритмов точного решения. Приведена статистика тестирования программных реализаций модификаций алгоритмов ее решения на данных порождающей задачи по критерию быстродействия.

Ключевые слова. Оптимальное регулирование расписаний, критерий быстродействия, алгоритм бинарных отсечений и ветвлений, динамическое программирование с отсевом локально наилучших вариантов.

Введение. Рассматриваемая задача управления расписаниями обслуживания одностадийной системы несвязанных параллельных приборов и ее приложения относительно хорошо изучены [1-8], [12-16].

Предложены варианты эффективных алгоритмов решения ряда модификаций задачи [10], [5], [6]. Однако окончательно вопрос разработки приемлемых по точности и быстродействию алгоритмов в настоящее время для множества модификаций задачи не решен и по-прежнему актуален.

Вполне очевидно, что упомянутые модификации задачи тесно связаны. Все их формальные представления принадлежат к классу труднорешаемых задач смешанного программирования. Используемые ныне, либо перспективные подходы для поиска приближенных решений опираются как на классические схемы: методы лагранжевой релаксации, генерации столбцов и декомпозиции, применяются известные вычислительные инструменты комбинаторной оптимизации и методов отсечений, программирование в ограничениях [1,2,13], эвристические алгоритмы [4], так и на комбинации перечисленных схем. Цель настоящей статьи – развитие аппарата (моделей и методов) решения задач оптимизации расписаний обслуживания систем несвязанных параллельных приборов, при наличии дополнительных условий, а также его применение в практических приложениях.

Постановки задачи оптимизации расписаний параллельной системы с задержками начала обслуживания.

Задача с рекурсиями в условиях. Рассмотрим ряд заявок, которые необходимо распределить между параллельными приборами при известном (различном) времени обслуживания таким образом, чтобы минимизировать

суммарное время обслуживания всех заявок (минимизировать время окончания работы всей обслуживающей системы, минимизировать суммарные затраты, либо максимизировать некоторый показатель качества обслуживания заявок). Прерывания обслуживания одних заявок в пользу других запрещены.

Пусть также известны задержки поступления заявок в параллельную обслуживающую систему в начальный момент времени. В этом случае при назначении заявок на приборы необходимо учитывать величины задержек поступления заявок. Обозначим задержку начала обслуживания i -й заявки прибором j через $\tau_{i,j}^0$ и упорядочим заявки для каждого прибора по возрастанию $\tau_{i,j}^0$. Тогда $T^0 = \|\tau_{i,j}^0\|$, $j = \overline{1, J}$, $i = \overline{1, I}$, (I - число заявок на входе системы, J - число приборов) можно интерпретировать как расписание на входе каждого из приборов системы. Здесь и далее $\|\cdot\|$ обозначает вектор, матрицу или тензор, соответствующей контексту размерности.

Через $t_{i,j}$ обозначим заданное время обслуживания заявки i прибором j , $T = \|t_{i,j}\|$, $j = \overline{1, J}$, $i = \overline{1, I}$. Кроме этого, пусть $\underline{b}_j$ и $\overline{b}_j$ соответственно минимальное и максимальное числа заявок, назначаемых на прибор j .

С учетом введенных обозначений формальная постановка задачи, синтеза оптимального расписания параллельной системы с задержками начала обслуживания, представляется следующим образом [4].

$$\sum_{j=1}^J x_{i,j} = 1, \quad i = \overline{1, I} \quad (1)$$

$$\underline{b}_j \leq \sum_{i=1}^I x_{i,j} \leq \overline{b}_j, \quad j = \overline{1, J} \quad (2)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если заявка } i \text{ назначена на прибор } j, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

$$y_{i,j} \geq 0, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (4)$$

$$\tau_{i,j} = \tau_{i,j}^0 - \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{k,j} + t_{k,j}) x_{k,j}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

$$\hat{\tau}_{i,j} = \tau_{i,j} + y_{i,j} \geq 0, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \hat{\tau}_{i,j} x_{i,j} + \sum_{i=1}^I t_{i,j} x_{i,j} \leq \lambda, \quad j = \overline{1, J}. \quad (7)$$

Здесь и далее $x_{i,j}$ переменные-назначения заявки i на прибор j , подлежащие определению. $\hat{\tau}_{i,j}$ имеют смысл фактических задержек начала выполнения i -й заявки j -м прибором после завершения обслуживания им предшествующей заявки. Компенсирующие переменные $y_{i,j}$ (4) вводятся для того, чтобы избежать появления отрицательных задержек $\tau_{i,j}$. Действительно, наличие неравенств (4), (6) гарантируют выполнение условий:

$$\hat{\tau}_{i,j} = \begin{cases} \tau_{i,j}, & \text{если } \tau_{i,j} \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Условия (1) - (3) характерны для задачи о назначениях. (1) обеспечивают назначения любой заявки только на один прибор. (2) - назначения не менее $\underline{b}_j$ и не более $\overline{b}_j$ заявок на любой прибор j . (5) - (6) вычисляют фактические задержки обслуживания i -й заявки j -м прибором, после окончания обслуживания им предшествующей заявки.

Если для ограничений (1)-(7) задан критерий качества (или эффективности) расписания, например

$$\lambda \rightarrow \min, \quad (8)$$

то (1) - (8) определяют задачу синтеза оптимальных по быстродействию расписаний параллельной системы с задержками начала обслуживания. (7) и (8) реализуют минимаксный критерий, имеющий смысл критерия максимального быстродействия (иногда называемого также критерием равномерной загрузки)

$$\text{вида } \max_j \left\{ \sum_{i=1}^I (t_{i,j} + \hat{\tau}_{i,j}) x_{i,j} \right\} \rightarrow \min.$$

Расписание, синтезируемое посредством решения задачи (1)-(8) полностью определяется оптимальными назначениями $x_{i,j}^*, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ и фактическими задержками при таких назначениях $\hat{\tau}_{i,j}^*, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$.

Отметим основные трудности, возникающие при решении задачи (1)-(8). Прежде всего, это наличие булевых и непрерывных переменных, рекурсий, присутствующих в условиях (5) и (7), и ранцевых ограничений (7), в совокупности определяющих принадлежность представленной постановки к классу NP-трудных задач смешанного целочисленного программирования. Доказательство NP-трудности сформулированной задачи даже при ее значительном упрощении с учетом исключения рекурсий в условиях можно найти в [2,6,7].

Задача с дизъюнкциями в ограничениях. Введем новые (непрерывные) переменные $C_{i,j}$ - время начала работы i на приборе j , и фиктивную завершающую работу $\bar{i}$ - для каждого прибора $j, j = \overline{1, J}$. Тогда

$$\sum_{j=1}^J x_{i,j} = 1, \quad i = \overline{1, I}$$

$$\underline{b_j} \leq \sum_{i=1}^I x_{i,j} \leq \overline{b_j}, \quad j = \overline{1, J}$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если заявка } i \text{ назначена на прибор } j, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}$$

$$C_{i,j} - C_{k,j} + t_{i,j} x_{i,j} - M w_{i,k,j} \leq 0,$$

$$C_{k,j} - C_{i,j} + t_{k,j} x_{k,j} + M w_{i,k,j} \leq M, \quad i \neq k, i, k = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (9)$$

Условия (9) определяют, что заявки (работы) i и k выполняются одновременно на приборе j . Тем самым реализуются логические операции «или» при выборе вариантов последовательностей обслуживания заявок. При этом

$$w_{i,k,j} = \begin{cases} 1, & \text{если заявка } i \text{ предшествует } k \text{ на приборе } j, \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (10)$$

и M - большое число. Для завершающей работы каждого прибора будем иметь:

$$C_{\bar{i},j} + t_{\bar{i},j} x_{\bar{i},j} \leq C_{\max}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (11)$$

где $\bar{i}$ - номер завершающей работы для прибора j ,

$$C_{\max} = \lambda, \quad \lambda \rightarrow \min. \quad (12)$$

(9) и (10) геометрически означают построение полных графов связей между заявками для каждого прибора с последующим выбором с учетом назначений $x_{k,j}$ кратчайших путей в каждом таком графе.

В задаче (1)-(3), (9)-(12) содержится $I \cdot J$ булевых переменных $x_{i,j}$ и $I \cdot J$ непрерывных переменных $C_{i,j} \geq \tau_{i,j}^0$. (9) и (10) добавляют $I \cdot J \cdot \left(\frac{2}{I}\right) = J \cdot I^2 \cdot (I-1)/2$ переменных $w_{i,k,j}$ и $2 \cdot I \cdot J \cdot \left(\frac{2}{I}\right) = J \cdot I^2 \cdot (I-1)$ ограничений. По этой причине использование постановки (1)-(3), (9)-(12) даже после элиминации части переменных весьма затруднительно.

Релаксация с априорным назначением последовательностей обслуживания. Для каждого прибора упорядочиваем заявки по возрастанию заданных задержек $\tau_{i,j}^0$. Всякую такую последовательность считаем последовательностью обслуживания заявок (работ) на каждой машине (приборе).

Вместо (9)-(10) применим условия:

$$C_{i,j} \geq \tau_{i,j}^0, \quad (13)$$

где $C_{i,j}$ - время начала работы i на машине j , $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$,

$$C_{i,j} + t_{i,j}x_{i,j} \leq C_{k,j}, \quad (14)$$

если заявка i непосредственно предшествует k

Сформулированную задачу обозначим как (1)-(3),(11)-(14).

Докажем эквивалентность постановок задачи (1)-(3), (9)-(12) и (1)-(3),(11)-(14) при условии упорядочения заявок по возрастанию исходных задержек $\tau_{i,j}^0$.

1 Рассмотрим случай $\tau_{i,j}^0 = 0$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$. При таких условиях оптимальное решение $C_{\max} = \lambda$, $x_{i,j}^*$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$ не зависит от порядка следования работ, поскольку ограничения (14) и (11) для $x_{i,j}^*$ справедливы при любом порядке следования, а (13) означают $C_{i,j} \geq 0$.

Действительно $C_{i,j} + t_{i,j}x_{i,j}^* = C_{k,j}$, если заявка i непосредственно предшествует k . И тогда время завершения последней работы любого прибора $j = \overline{1, J}$ составит величину $C_j = \sum_{i=1}^I t_{i,j}x_{i,j}^* \leq C_{\max}$. Это непосредственно означает, что при $\tau_{i,j}^0 = 0$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$ решения задач (1)-(3),(9)-(12) и (1)-(3),(11)-(14) совпадают.

2 Рассмотрим систему из одного прибора и упорядочим список заявок по возрастанию величин $\tau_i^0 > 0$, $i = \overline{1, I}$. ($0 \leq \tau_1^0 \leq \tau_2^0 \leq \dots \leq \tau_i^0 \leq \tau_k^0 \leq \dots \leq \tau_I^0$) Рассмотрим последовательно координаты решения $C_1 = \tau_1^0$, $C_2 = \tau_1^0 + t_1x_1$, $C_3 = \max\{\tau_2^0, C_2\} + t_2x_2$, $C_{i+1} = \max\{\tau_i^0, C_i\} + t_ix_i$, $i = \overline{1, I}$. В общем случае, если работа i непосредственно предшествует k . $\max\{\tau_i^0, C_i\} + t_ix_i = C_k$. Очевидно, что для завершающей работы I $C_I = C_{\max}$.

Изменим порядок обслуживания заявок i и k на обратный (k непосредственно предшествует i). Не теряя общности, будем полагать выполнение условий $\tau_k^0 \geq \tau_i^0 > C_i$. Тогда $C'_i = \tau_k^0 + t_kx_k = C_k$ и $C'_{k+1} = C'_i + t_ix_i$, откуда непосредственно следует $C'_{\max} = C_{\max} + t_ix_i$.

Если же $C_i > \tau_k^0 \geq \tau_i^0$, то значения τ_i^0 и τ_k^0 условно можно считать равными нулю. Как показано выше, в этом случае изменение порядка

обслуживания заявок (14) не приводит к изменению значения $C_{\max}$ ($C'_{\max} = C_{\max}$).

3 Таким образом, любая замена порядка обслуживания заявок прибором отличным от заданного последовательностью $0 \leq \tau_1^0 \leq \tau_2^0 \leq \dots \leq \tau_i^0 \leq \tau_k^0 \leq \dots \leq \tau_I^0$, может привести только к увеличению общего времени обслуживания $C_{\max}$.

4 Распространим результат на общий случай $\tau_{i,j}^0 \geq 0$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$.

Упорядочим задержки для каждого прибора $0 \leq \dots \leq \tau_{i,j}^0 \leq \tau_{k,j}^0 \leq \dots \leq \tau_{I,j}^0$ $j = \overline{1, J}$. Тогда для любого прибора замена порядка обслуживания заявок отличным от заданного, как это следует из п. 2.5., может привести только к увеличению общего времени обслуживания $C_{\max}$. Откуда непосредственно следует эквивалентность постановок (1)-(3),(9)-(12) и (1)-(3),(11)-(14).

Алгоритмы решения. Существует множество алгоритмов решения рассмотренной задачи, использующих различные подходы, от разновидностей локального поиска [2,3,16], аппроксимационных алгоритмов [6,7], программирования в ограничениях [1], динамического программирования [4,5].

Реализации алгоритмов оптимизации, примененных в настоящей статье, опираются на работы автора, посвященные применению динамического программирования (ДП) с отсеком локально наилучших расписаний на каждом шаге динамического программирования [4-5] и на работы, посвященные методу бинарных отсечений и ветвлений (МБОВ) смешанного целочисленного программирования [9-11]. МБОВ был модифицирован специально для решения задачи (1)-(3),(11)-(14).

Ниже приведены результаты тестирования алгоритмов на сгенерированных исходных данных рассматриваемой задачи максимально приближенных к реальным размерностям.

Результаты тестирования программных реализаций алгоритмов. В нижеследующих таблицах (таблица 1-3) показаны сравнительные результаты тестирования программных реализаций, МБОВ и модификаций параметрического алгоритма ДП [4,5].

Использованы 3 группы тестовых примеров, сгенерированных датчиками случайных чисел (по 10 тестов в каждой группе). Размерности тестов по группам: 5 приборов, 100 заявок в первой группе; 10 приборов 100 заявок во второй группе; 30 приборов 100 заявок в третьей группе.

Все исходные данные тестов вместе с оптимальными решениями можно найти по ссылке [17].

В таблицах 1-3 приводятся оценки решений (значения целевых функций) λ^* . Во всех таблицах столбцы, обозначенные символом №, отображают номер теста в группе. Графы «Время» отображают время работы соответствующей модификации алгоритма, измеренное в минутах и секундах (в формате «минуты:секунды»), Размерности группы тестов в табл. 1: 5 приборов, 100 заявок (5x100), в табл. 2: 10 приборов, 100 заявок (10x100). Таблица 3

отображает результаты применения всех рассмотренных алгоритмов с разными параметрами к группе тестов размерностью 30 приборов, 100 заявок (30x100).

Таблицы содержат результаты тестирования: жадного алгоритма (графа A_1), параметрического алгоритма ДП A_{P_3} (с разными комбинациями параметров), комбинации алгоритмов $A_{P_3} + A_C$ (параметрического алгоритма ДП с улучшающим алгоритмом) [4], и алгоритма бинарных отсечений и ветвлений A_{bc} [11].

Таблица 1. Результаты тестирования A_1 , A_{P_3} , $A_{P_3} + A_C$, A_{bc}
(размерность 5x100)

№	$A_{P_3} + A_C$	A_{P_3}	A_{bc}
1	350	351	340
2	327	330	315
3	364	369	348
4	349	351	343
5	328	331	322
6	349	363	339
7	390	393	378
8	378	379	372
9	366	367	348
10	377	377	352
Время	3:23	2:15	0:01-0:15

Таблица 2. Результаты тестирования алгоритмов A_1 , A_{P_3} , $A_{P_3} + A_C$, A_{bc}
(размерность 10x100)

№	A_1	A_{P_3}	$A_{P_3} + A_C$	A_{bc}
1	161	147	144	144
2	137	118	118	116
3	163	141	138	131
4	144	126	126	120
5	154	141	139	135
6	154	132	129	127
7	169	138	138	130
8	152	129	129	124
9	143	131	131	123
10	141	119	119	119
Время	0:00	2:21	2:45	0:01-0:32

Таблица 3. Результаты тестирования A_1 , A_{P_3} , $A_{P_3} + A_C$, A_{bc}
(размерность тестов 30x100), ,

№	A_{P_3}	A_1	A_{bc}
1	106	106	106
2	105	105	105
3	107	107	107
4	106	106	106
5	108	108	108
6	114	114	114
7	102	102	102
8	106	106	106
9	106	106	106
10	105	105	105
Время	2:15	0:00	0:01-0:17

Легко заметить, что в большинстве случаев, представленные в настоящей статье модификации МБОВ параметрического и улучшающего алгоритмов, имеют значительные преимущества перед построенными ранее алгоритмами. A_{bc} и вовсе позволил за незначительное время получить точные решения всех тестовых примеров.

Единственный недостаток данного алгоритма – отсутствие доказанной полиномиальной сходимости.

Такая сходимость доказана для алгоритмов A_{P_3} и $A_{P_3} + A_C$ [5]. Их тестирование экспериментально подтверждает близость получаемых решений к оптимальным. Максимальное отклонение от оптимумов не превышает 4 процентов, максимальное – 7 процентов.

Еще один, лежащий на поверхности, вывод заключается в том, что чем более жестки ресурсные условия задачи (в данном случае – отношение числа заявок к числу приборов), тем выше преимущество разработанных инструментов в близости к оптимумам получаемых решений.

Время счета всех тестов оказалось вполне приемлемым и, фактически, линейно зависящим от размерности тестов, что экспериментально подтверждает эффективность реализованных алгоритмов.

Результаты последней группы тестов, имеющих самое низкое отношение числа заявок к числу приборов (3,33 заявки на прибор), свидетельствуют о значительном числе равноценных решений. В этом случае результаты даже самого плохого по точности (жадного) алгоритма никаким способом улучшить не удастся.

Данные результаты косвенно свидетельствуют о наличии условий, регулирующих трудоемкость и точность применяемых алгоритмов оптимизации расписаний несвязанных параллельных приборов при наличии ограничений на сроки принятия решений. В частности, повышения точности

решений можно достичь не увеличением трудоемкости алгоритма, а регулирования ресурсных ограничений.

Для комплекса противоракетной обороны, например, это означает увеличения числа пусковых установок при неизменных оценках числа целей. При этом снижается соотношение числа целей и числа пусковых установок. А наличие множества модификаций параметров алгоритма поиска расписаний позволяет находить разумный компромисс между точностью решений и временем счета.

Заключение. Основными результатами явились разработка, программная реализация и сравнительный анализ свойств модификаций алгоритмов поиска приближений к оптимальным решениям NP-трудной задачи составления расписаний системы несвязанных параллельных приборов с задержками начала обслуживания по критерию быстродействия.

Результаты исследования программных реализаций алгоритмов на тестах, приближенных к реальным размерностям, позволяют сделать вывод о непосредственной применимости разработанного инструментария к потребностям практики. Таковыми могут быть управление назначениями и расписаниями рейсов воздушных судов авиакомпании [13], [15], определение целеназначений, планирование расписаний бурением скважин нефтегазоконденсатных месторождений [5] и многое другое [7], [8]. Разработанное программное обеспечение позволяет в широких диапазонах варьировать скорость получения решений и точность результатов, сохраняя для всех вариантов полиномиальную трудоемкость.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект №. 19-29-01017.

Библиографический список

1. Kaabi J. A Survey of Parallel Machine Scheduling under Availability Constraints /Kaabi J., Harrath Y. // International Journal of Computer and Information Technology. – 2014. – Vol. 03, iss. 02. – P. 238-245.
2. Lin Y.K. Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem Using an Ant Colony Optimization Approach /Lin Y.K., Hsieh H.T., Hsieh F.Y. // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 6. – P. 1798–1803.
3. Lin Y. K. Particle Swarm Optimization Algorithm for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Release Dates/ Lin Y. K. // Mathematical Problems in Engineering. – Volume 2013. – Article ID 409486. – 9 p.
4. Avdeenko T. V. Efficient approaches to scheduling for unrelated parallel machines with release dates/ Avdeenko T. V., Mesentsev Y. A. // *IFAC-Papers Online* (IFAC Proceedings Volumes). - Vol. 49, iss. 12: 8 *IFAC conference on manufacturing modelling, management and control MIM 2016*, P. 1743-1748. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589631631117X>
5. Avdeenko T.V. Heuristic approach to unrelated parallel machines scheduling under availability and resource constraints/Avdeenko T. V., Mezentsev Y. A., Estraiikh I.V.// *IFAC-PapersOnline*. - 2017. - Vol. 50, iss. 1. - P. 13096-13101.

6.Lenstra J.K, Shmoys D.B, Tardos E. Approximation algorithms for scheduling unrelated parallel machines. Report OS-R8714, Centre for Mathematics and Computer Science, Amsterdam; 1987.

7.Vazirani V. Approximation Algorithms . – Springer, 2001. – 375 p.

8.Santos F.C. The Problem of Scheduling in Parallel Machines: A Case Study/ Santos F.C., Vilarinho P. M. // Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2010. – Vol. III.

9. Мезенцев, Ю.А. Метод бинарных отсечений и ветвлений целочисленного программирования / Ю.А. Мезенцев // Доклады академии наук высшей школы РФ. – 2011. – № 1(16). – С. 12-25.

10.Mezentsev, Y. A. Binary Cut-and-Branch Method for Solving Linear Programming Problems with Boolean Variables / Y. A. Mezentsev // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1623. – P. 72-85.

11.Mezentsev, Y. Binary cut-and-branch method for solving mixed integer programming problems Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov), CNSA 2017 <https://doi.org/10.1109/cnsa.2017.7973989>

12. Gharbi A. Minimizing Makespan on Parallel Machines Subject to Release Dates and Delivery Times / Gharbi A., Haouari M. // Journal of Scheduling. – 2002. – Vol. 5, N 4. – P. 329 - 355.

13. Rosenberger J. M.. Topics in Airline Operations. PhD thesis, School of Industrial & Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2002.

14. Grönkvist M. The Tail Assignment Problem. PhD thesis, Chalmers University of Technology and Göteborg University, Göteborg, Sweden 2005.

15. Hane C. A. The fleet assignment problem: solving a large-scale integer program / Hane C. A., Barnhart C., Johnson E. L., Marsten R. E., Nemhauser G. L., Sigismondi G. // *Mathematical Programming*, 70:211–232, 1995.

16. Lee W.C. A simulated annealing approach to makespan minimization on identical parallel machines/ Lee W.C., Wu C.C., Chen P. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – Vol. 31, N 3–4. – P. 328–334.

17. Link to tests and best solutions achieved: <https://drive.google.com/drive/folders/16ez7NQd1cPPIymf0ALYnJzgZquGBXHga?ogsrc=32>

Bibliograficheskiy spisok

1.Kaabi J. A Survey of Parallel Machine Scheduling under Availability Constraints /Kaabi J., Harrath Y. // *International Journal of Computer and Information Technology*. – 2014. – Vol. 03, iss. 02. – P. 238-245.

2.Lin Y.K. Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem Using an Ant Colony Optimization Approach /Lin Y.K., Hsieh H.T., Hsieh F.Y. // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. – 2012. – Vol. 6. – P. 1798–1803.

3.Lin Y. K. Particle Swarm Optimization Algorithm for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Release Dates/ Lin Y. K. // *Mathematical Problems in Engineering*. – Volume 2013. – Article ID 409486. – 9 p.

4. Avdeenko T. V. Efficient approaches to scheduling for unrelated parallel machines with release dates/ Avdeenko T. V., Mesentsev Y. A. // *IFAC-Papers Online* (IFAC Proceedings Volumes). - Vol. 49, iss. 12: 8 *IFAC conference on manufacturing modelling, management and control MIM 2016*, P. 1743-1748. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589631631117X>
 5. Avdeenko T.V. Heuristic approach to unrelated parallel machines scheduling under availability and resource constraints/Avdeenko T. V., Mezentsev Y. A., Estraiikh I.V.// *IFAC-PapersOnline*. - 2017. - Vol. 50, iss. 1. - P. 13096-13101.
 6. Lenstra J.K, Shmoys D.B, Tardos E. Approximation algorithms for scheduling unrelated parallel machines. Report OS-R8714, Centre for Mathematics and Computer Science, Amsterdam; 1987.
 7. Vazirani V. Approximation Algorithms . – Springer, 2001. – 375 p.
 8. Santos F.C. The Problem of Scheduling in Parallel Machines: A Case Study/ Santos F.C., Vilarinho P. M. // *Proceedings of the World Congress on Engineering*. – 2010. – Vol. III.
 9. Mezentsev. Yu.A. Metod binarnykh otsecheniy i vetvleniy tselochislennogo programmirovaniya / Yu.A. Mezentsev // *Doklady akademii nauk vysshey shkoly RF*. – 2011. – № 1(16). – S. 12-25.
 10. Mezentsev, Y. A. Binary Cut-and-Branch Method for Solving Linear Programming Problems with Boolean Variables / Y. A. Mezentsev // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2016. – Vol. 1623. – P. 72-85.
 11. Mezentsev, Y. Binary cut-and-branch method for solving mixed integer programming problems *Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov)*, CNSA 2017 <https://doi.org/10.1109/cnsa.2017.7973989>
 18. Gharbi A. Minimizing Makespan on Parallel Machines Subject to Release Dates and Delivery Times / Gharbi A., Haouari M. // *Journal of Scheduling*. – 2002. – Vol. 5, N 4. – P. 329 - 355.
 19. Rosenberger J. M.. Topics in Airline Operations. PhD thesis, School of Industrial & Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2002.
 20. Grönkvist M. The Tail Assignment Problem. PhD thesis, Chalmers University of Technology and Göteborg University, Göteborg, Sweden 2005.
 21. Hane C. A. The fleet assignment problem: solving a large-scale integer program / Hane C. A., Barnhart C., Johnson E. L., Marsten R. E., Nemhauser G. L., Sigismondi G. // *Mathematical Programming*, 70:211–232, 1995.
 22. Lee W.C. A simulated annealing approach to makespan minimization on identical parallel machines/ Lee W.C., Wu C.C., Chen P. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – Vol. 31, N 3–4. – P. 328–334.
- Link to tests and best solutions achieved:
<https://drive.google.com/drive/folders/16ez7NQd1cPPIymf0ALYnJzgzquGBXHga?ogsrc=32>

Мезенцев Юрий Анатольевич. Новосибирский государственный технический университет: Россия, 630073, Новосибирск, проспект К. Маркса 20. Доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления. mesyan@yandex.ru, mezencev@corp.nstu.ru .

**OPTIMIZATION OF SCHEDULING UNRELATED PARALLEL MACHINES
SYSTEMS WITH RELEASE DATES**

Mezentsev Y. A.

The original formulation and algorithm for solving one of the key problems of the theory of schedules and a number of its modifications are presented. The problem of optimal scheduling for a parallel system consists in the generation or control of schedules that minimizes the schedule length or the losses from schedule disruptions in the completion of jobs on machines. This problem is NP-hard and cannot be solved exactly for any real-life number of dimensions. Software implementations of the algorithm modifications have been tested on the data of a generating problem by the Cmax criterion; the corresponding statistics is provided.

Keywords: Optimal schedules, the criterion of performance, binary cut and branch algorithm, dynamic programming with siftings of the locally worst options.

Mezentsev Yurii Anatolievich, doctor of technical sciences, professor, mesyan@yandex.ru, Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University

АППРОКСИМАЦИЯ ЗАКОНА ВЕЙБУЛЛА СМЕСЯМИ СПЕЦИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭРЛАНГА И НОРМИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭРЛАНГА

Карташов Л.Е.¹, Копп В.Я.², Заморёнов М.В.³

***Аннотация.** Рассмотрен метод аппроксимации закона распределения Вейбулла смесью специальных распределений Эрланга и смесью нормированных распределений Эрланга. Рассмотрены численные примеры, определена погрешность аппроксимации, определены погрешности дисперсии. Получены свертки второго порядка предложенных для аппроксимации законов, определены погрешности дисперсии для свертки.*

***Ключевые слова.** Моделирование, распределение Вейбулла, распределение Эрланга, аппроксимация, свертки.*

Введение. При моделировании функционирования технических систем с учетом их надежности [1, 2, 3, 4] достаточно часто используется распределение Вейбулла [5, 6]. Распределение является двухпараметрическим, включающим в себя в качестве частного случая показательное распределение. Оно используется для описания длительности безотказной работы технических систем, при эксплуатации которых преобладают отказы в результате износа. Распределение Вейбулла хорошо описывает распределение наработки на отказ невосстанавливаемых изделий, наработок сложных систем, состоящих из последовательно соединенных дублированных элементов, характеристик прочности инструмента.

Однако при аналитико-вероятностном моделировании сложных технических систем использование распределения Вейбулла достаточно проблематично. Для определения свертки вероятностных распределений удобно использовать преобразование Лапласа, а для распределения Вейбулла невозможно выполнить такое преобразование. Поэтому встаёт задача аппроксимации распределения Вейбулла такой функцией распределения, для которой можно получить преобразование Лапласа.

Выбор аппроксимирующего распределения зависит от поставленной цели исследования. В простейшем случае является достаточным, чтобы совпадали первые моменты распределений, например, среднее время наработки на отказ или среднее время восстановления. В других случаях требуется установить вероятностно-временные характеристики распределения, когда необходимо найти вероятность безотказной работы системы в течение заданного периода времени. Для нахождения таких значений требуется знание закона распределения, поскольку он является наиболее полной характеристикой соответствующей случайной величины.

Следовательно, при аппроксимации распределения Вейбулла требуется подобрать такой закон распределения, который в статистическом смысле

соответствовал исходному закону, и кроме этого, позволял осуществлять преобразование Лапласа. Наиболее естественным представляется рассмотреть типовые законы распределения. Преимущество применения типовых законов распределения – их изученность и возможности получения состоятельных, несмещенных и эффективных оценок параметров. Однако типовые законы распределения могут и не позволить выбрать наиболее подходящий закон распределения. Кроме того, необходимо получить оценку погрешности аппроксимации.

Постановка задачи. Пусть функция плотности распределения вероятности представляет собой распределения Вейбулла

$$f_w(t) = \frac{\lambda}{k} \left(\frac{t}{k} \right)^{\lambda-1} \exp \left(- \left(\frac{t}{k} \right)^{\lambda} \right), \quad (1)$$

где k – параметр масштаба, λ – параметр формы ($k > 0$, $\lambda > 0$), задана на промежутке $[0, \infty]$. Требуется построить ее аппроксимацию, причем аппроксимирующая функция должна иметь преобразование Лапласа. Для распределения Вейбулла математическое ожидание M_w , дисперсия D_w и коэффициент вариации v_w определяются по формулам:

$$M_w = k \Gamma \left(\frac{1}{\lambda} + 1 \right), \quad (2)$$

$$D_w = k^2 \left(\Gamma \left(\frac{2}{\lambda} + 1 \right) - \Gamma^2 \left(\frac{1}{\lambda} + 1 \right) \right), \quad (3)$$

$$v_w = \sqrt{\Gamma \left(\frac{2}{\lambda} + 1 \right) / \Gamma^2 \left(\frac{1}{\lambda} + 1 \right) - 1}. \quad (4)$$

Из формулы видно (4), коэффициент вариации v_w зависит только от параметра формы распределения λ . Наибольший интерес представляет случай, когда $\lambda > 1$, и соответственно, $0 < v_w < 1$. При $\lambda = 1$ распределение Вейбулла вырождается в экспоненциальное распределение. Случай, когда $\lambda < 1$, и коэффициент вариации $1 < v_w < \infty$, встречается достаточно редко.

Аппроксимация специальным распределением Эрланга. Как отмечается в [7], весьма полезно иметь набор специальных функций, которые могут быть использованы для представления распределений наработки на отказ. Такие распределения важны тем, что формулы, используемые для них при аналитическом моделировании стохастических систем, сильно упрощаются. В указанной выше работе рекомендуется использовать специальное распределение Эрланга. Плотность распределения вероятности для него определяется выражением

$$f(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

где n – положительное целое число.

Соответствующее данному распределению преобразование Лапласа равно

$$f(s) = \left(\frac{\lambda}{\lambda + s} \right)^n. \quad (6)$$

Важность данного класса распределений заключается в том, что, во-первых, преобразования Лапласа для него имеет простой вид, а во-вторых, оно тесно связано с показательным распределением, которое является частным случаем распределения при $n=1$.

В [8] распределение (5) называется специальным распределением Эрланга порядка n . Там же указано, что при аппроксимации эмпирического распределения распределением Эрланга прежде всего целесообразно попробовать подобрать распределение вида (5). Желательно, чтобы n имело возможно меньшее значение. Если потребовать, чтобы первый и второй моменты аппроксимирующего распределения были близки к соответствующим моментам эмпирического распределения, то n не может быть намного меньше квадрата величины, обратной коэффициенту вариации.

Найдем математическое ожидание M_e , дисперсию D_e и коэффициент вариации ν_e специального распределения Эрланга:

$$M_e = \frac{n}{\lambda}, \quad (7)$$

$$D_e = \frac{n}{\lambda^2}. \quad (8)$$

$$\nu_e = \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (9)$$

Если математическое ожидание и коэффициент вариации распределения Вейбулла равны M_w и ν_w , то приравняв выражение (7) и (9) этим значениям, получим систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{n}{\lambda} = M_w \\ \frac{1}{\sqrt{n}} = \nu_w \end{cases} \quad (10)$$

из которой можно получить параметры специального распределения Эрланга n и λ :

$$n = \frac{1}{\nu_w^2}, \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{n}{M_w}. \quad (12)$$

Поскольку n должно быть целым, то значение выражения (11) необходимо округлить до ближайшего целого и найти из (12) значение λ .

Тогда алгоритм аппроксимации распределения Вейбулла специальным распределением Эрланга будут выглядеть следующим образом:

- 1) определяются математическое ожидание и коэффициент вариации распределения Вейбулла;
- 2) из выражения (11) рассчитать значение параметра n и полученное значение n округлить до ближайшего целого;
- 3) из выражения (12) находится значение λ .

В качестве примера рассмотрим плотность распределения Вейбулла, у которой параметр формы равен 1.7, а параметр масштаба равен 2.5. Для данного распределения математическое ожидание M_w , дисперсия D_w и коэффициент вариации ν_w соответственно равны

$$M_w = 2.230611256, D_w = 1.824092668, \nu_w = 0.6054796614.$$

Из уравнения (11) получаем значение параметра распределения Эрланга $n=2.727726865$. Округляем n до 3 и из (12) находим $\lambda=1.344922829$. Записываем уравнение специального распределения Эрланга:

$$f(t) = 1.216359918 \cdot t^2 \cdot e^{-1.34492289t},$$

и построим график плотности распределения Вейбулла и плотности полученного аппроксимирующего распределения, которые приведены на **Рис.1**.

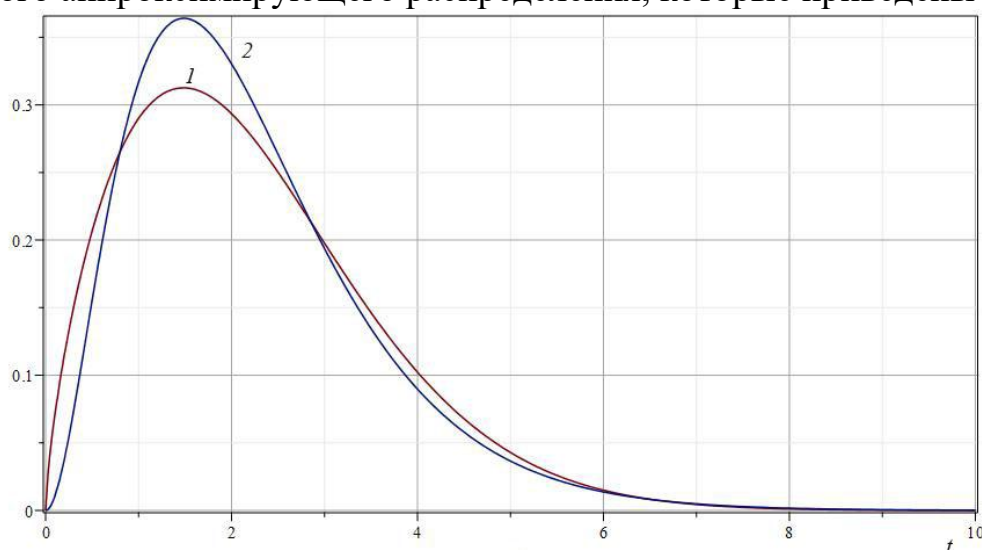


Рис.1 – Плотности распределения Вейбулла (1) и аппроксимация специальным распределением Эрланга (2)

Погрешность аппроксимации представлена на Рис.2.

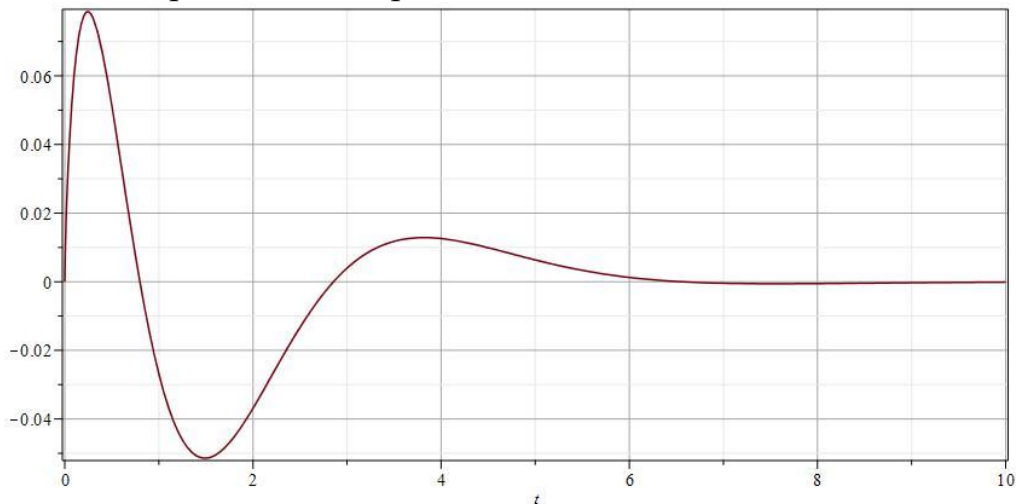


Рис.2 – Погрешности аппроксимации для распределения Вейбулла

Погрешность дисперсии при данных параметрах составляет 9.08%. Понятно, что погрешность дисперсии будет равна нулю только тогда, когда n , полученное из формулы (11), будет целым. Можно определить, как будет меняться погрешность при изменении параметра формы λ распределения Вейбулла. Рассчитанные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Погрешность дисперсии аппроксимации

λ	1.479	1.512	1.549	1.585	1.621	1.656	1.691	1.725	1.755
n	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
$\tilde{n}$	2	2	2	2	3	3	3	3	3
$\delta D, \%$	5.68	10.06	15.07	20.02	16.63	13.32	9.95	6.63	3.66

Здесь n – параметр распределения Эрланга, полученный из (11), $\tilde{n}$ – округленное до ближайшего целого значение n , δD – погрешность дисперсии. Как видно из таблице 1, максимальное значение погрешности дисперсии составляет 20.02%, что не является удовлетворительным.

Для того, чтобы добиться равенства дисперсии распределения Вейбулла и аппроксимирующего распределения, можно использовать смесь специальных распределений Эрланга.

Для распределения Вейбулла определим моменты и коэффициент вариации и, пользуясь формулой (11), определим два параметра n_1 и n_2 , округляя полученные значения до ближайшего меньшего целого для n_1 и до ближайшего большего целого для n_2 . По формуле (12) найдем параметры λ_1 и λ_2 для найденных n_1 и n_2 . Получим два специальных распределения Эрланга

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 (\lambda_1 t)^{n_1-1}}{(n_1-1)!} e^{-\lambda_1 t}, f_2(t) = \frac{\lambda_2 (\lambda_2 t)^{n_2-1}}{(n_2-1)!} e^{-\lambda_2 t}. \quad (12)$$

Тогда из распределений (12) можно построить плотность распределения, которое представляет собой смесь данных распределений:

$$f_m(t) = \pi_1 f_1(t) + \pi_2 f_2(t), \quad (13)$$

причем $\pi_1 + \pi_2 = 1$.

Математическое ожидание и дисперсия данного распределения определяются по формулам:

$$M_m = \pi_1 M_1 + \pi_2 M_2, \quad (14)$$

$$D_m = \pi_1 m_{21} + \pi_2 m_{22} - M_m^2, \quad (15)$$

где m_{21} и m_{22} – вторые начальные моменты распределений (12). Поскольку математические ожидания распределений (12) и распределения Вейбулла совпадают, для определения коэффициентов смеси π_1 и π_2 воспользуемся формулой (15). Запишем её в виде

$$\pi_1 m_{21} + (1 - \pi_1) m_{22} = D_m + M_m^2,$$

и

$$\pi_1 = \frac{D_m + M_m^2 - m_{22}}{m_{21} - m_{22}}, \quad (16)$$

а

$$\pi_2 = 1 - \pi_1. \quad (17)$$

Начальные моменты для распределений (12) находятся по формулам:

$$m_{21} = \frac{n_1(n_1 + 1)}{\lambda_1^2}, \quad m_{22} = \frac{n_2(n_2 + 1)}{\lambda_2^2}. \quad (18)$$

Поскольку необходимо, чтобы аппроксимирующее распределение имело одинаковую дисперсию с распределением Вейбулла, в (16) подставляем вместо дисперсии смеси D_m дисперсию для распределения Вейбулла D_w .

Таким образом, *алгоритм аппроксимации распределения Вейбулла смесью специальных распределений Эрланга* будут выглядеть следующим образом:

- 1) определяются математическое ожидание и коэффициент вариации распределения Вейбулла;
- 2) из выражения (11) рассчитать значение параметра n и полученное значение округлить до ближайшего меньшего целого n_1 ;
- 3) из выражения (12) найти значение λ_1 ;
- 4) из выражения (11) рассчитать значение параметра n и полученное значение округлить до ближайшего большего целого n_2 ;
- 5) из выражения (12) найти значение λ_2 ;
- 6) из выражения (16) и (17) определить значения π_1 и π_2 .

В качестве примера рассмотрим аппроксимацию плотности распределения Вейбулла, параметры которой были приняты в предыдущем примере.

Из уравнения (11) получаем значение параметра распределения Эрланга $n=2.727726865$. Округляем n до 2 и из (12) находим $\lambda_1=1.344922829$. Записываем уравнение для первого специального распределения Эрланга:

$$f_1(t) = 0.8039188511 \cdot t \cdot e^{-0.8966152191t}.$$

Округляем n до 3 и из (12) находим $\lambda_2=1.344922829$. Записываем уравнение для второго специального распределения Эрланга:

$$f_2(t) = 1.216359918 \cdot t^2 \cdot e^{-1.34492289t}.$$

Для полученных распределений определяем вторые начальные моменты и по формулам (16, 17) находим коэффициенты смеси:

$$\pi_1 = 0.19963372891, \pi_2 = 0.8003662711.$$

Тогда уравнение плотности распределения для аппроксимирующей функции примет вид:

$$f(t) = 0.1604893180 \cdot t \cdot e^{-0.8966152191t} + 0.9735334519 \cdot t^2 \cdot e^{-1.34492289t}.$$

Построим график плотности распределения Вейбулла и плотности полученного аппроксимирующего распределения, которые приведены на **Рис.3**.

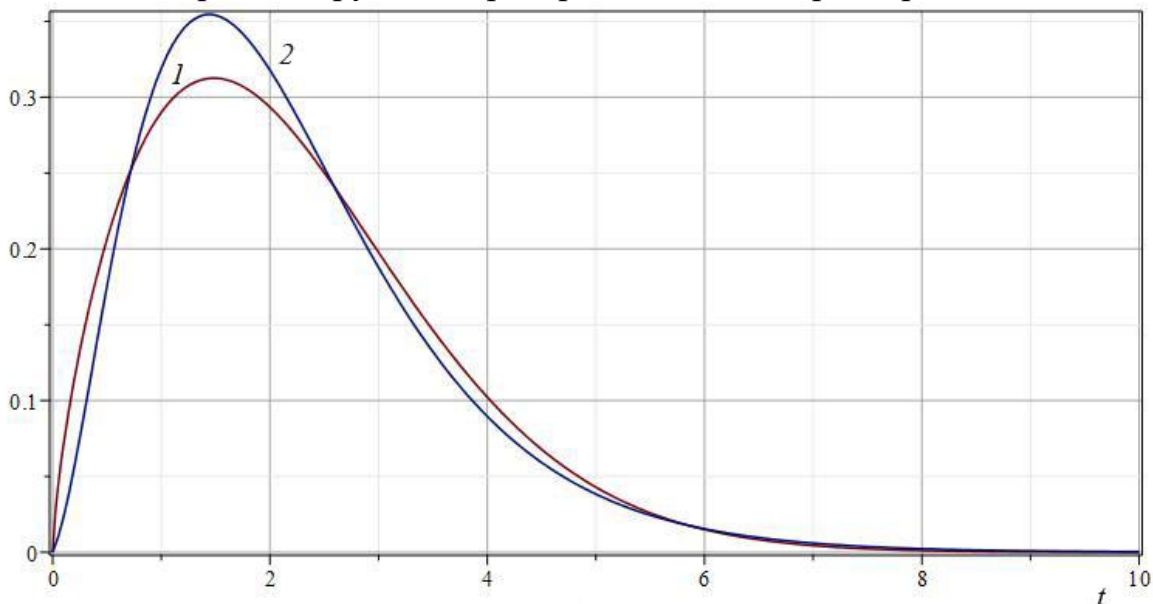


Рис.3 – Плотности распределения Вейбулла (1) и аппроксимация смесью специальных распределений Эрланга (2)

Погрешность аппроксимации представлена на **Рис. 4**.

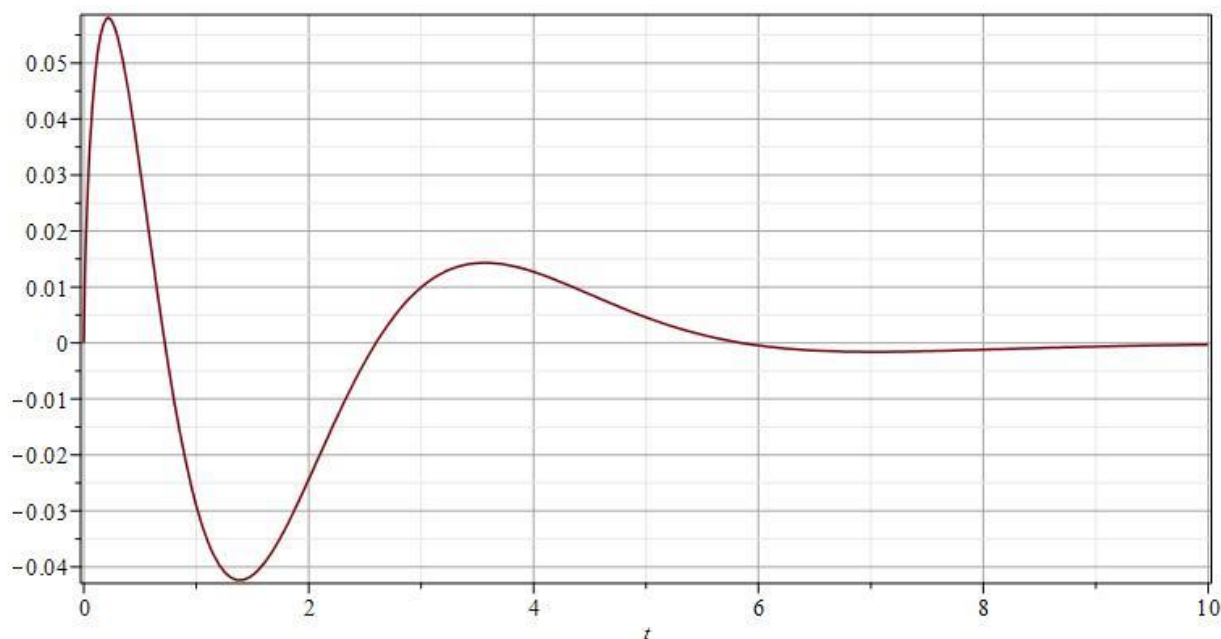


Рис.4 – Погрешности аппроксимации для распределения Вейбулла

Аппроксимация нормированным распределением Эрланга. В [9] рассматривается нормированное распределение Эрланга, плотность распределения вероятности для которого определяется выражением

$$f(t) = \frac{(\lambda n)^n t^{(n-1)}}{(n-1)!} e^{-\lambda n t} . \quad (19)$$

Данное распределение также может использоваться для аппроксимации распределения Вейбулла, причем процедура аппроксимации подобна аппроксимации специальным распределением Эрланга. Математическое ожидание M_e , дисперсия D_e и коэффициент вариации ν_e нормированного распределения Эрланга равны:

$$M_e = \frac{1}{\lambda} , \quad (20)$$

$$D_e = \frac{1}{n\lambda^2} , \quad (21)$$

$$\nu_e = \frac{1}{\sqrt{n}} . \quad (22)$$

Можно составить систему уравнений, аналогичную (10), из которой можно получить параметры распределения:

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda} = M_w \\ \frac{1}{\sqrt{n}} = \nu_w \end{cases} \quad (23)$$

Алгоритм определения параметров полностью подобен предыдущему. Для того, чтобы дисперсия аппроксимирующего распределения была равна дисперсии распределения Вейбулла, можно также воспользоваться смесью нормированных распределений Эрланга. Формулы (14) и (15) применимы и для данного распределения, с единственным отличием: вторые начальные моменты для нормированного распределения Эрланга вычисляются по формуле

$$m_2 = \frac{n-1}{n\lambda^2}. \quad (24)$$

Оценка погрешности дисперсии свертки. Кроме получения аппроксимирующих распределений несомненный интерес представляет оценка погрешности дисперсии свертки этих распределений и распределения Вейбулла. Для аппроксимирующих распределений, найденных в рассмотренных численных примерах, найдем свертку второго порядка. Для специального распределения Эрланга она равна

$$f(t) = 0.049317715 \cdot t^5 \cdot e^{-1.34492282 \cdot t},$$

а для смеси специальных распределений Эрланга

$$f(t) = (0.032t^5 - 2.245 \cdot 10^{-16}t^3 + 1.555t^2 + 13.873t + 46.417) \cdot e^{-1.345 \cdot t} + (0.005t^3 + 6.936t - 46.417) \cdot e^{-0.897 \cdot t}.$$

Для первого распределения математическое ожидание и дисперсия равны $M=4.46122251$ и $D=3.317084381$ соответственно. Для второго распределения: $M=4.461222509$ и $D=3.648185331$.

В аналитическом виде получить свертку распределения Вейбулла не представляется возможным. Для оценки параметров свертки распределения Вейбулла предлагается воспользоваться имитационным моделированием. В системе GPSS Word Student разработана представленная ниже программа, позволяющая получить гистограмму распределения и значения математического ожидания и среднеквадратичного отклонения.

Trans	TABLE	X\$Tref,0.2,0.2,76	;Таблица для гистограммы
	GENERATE	,,,1	;Генерация транзакта
Again	SEIZE	Sets	;Отказ системы
	MARK	1	;Начало отказа
	ADVANCE	(Weibull(1,0,2.5,1.7))	
	ADVANCE	(Weibull(2,0,2.5,1.7))	
	MARK	2	
	RELEASE	Sets	;Конец отказа
	SAVEVALUE	Tref,(P2-P1)	;Время отказа
	TABULATE	Trans	;Табуляция отказа
	SPLIT	1,Again	
	TERMINATE	1	;Вывод транзакта
START 1000000			

Результат моделирования после 10^6 отказов представлен на **Рис.5**. Кроме гистограммы, в окне таблицы отображается среднее значение времени наработки и среднеквадратичное отклонение.

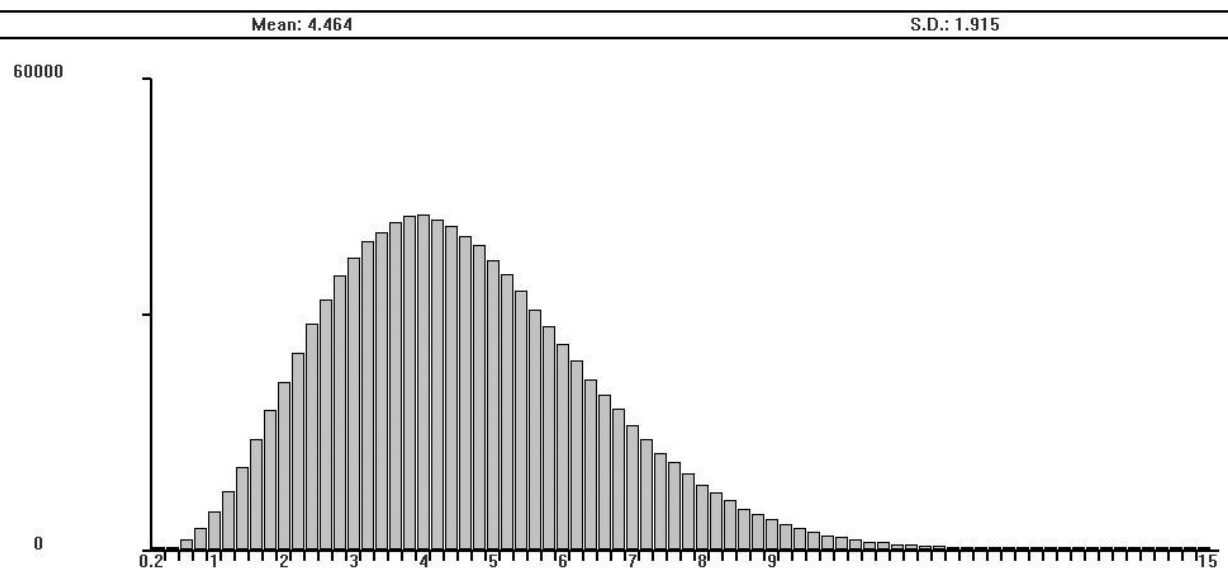


Рис.5 – Гистограмма свертки закона Вейбулла

Можно утверждать, что математическое ожидание сверток аппроксимаций и свертки закона Вейбулла совпадают. Дисперсия свертки закона Вейбулла равна 3.783025, и относительная погрешность дисперсии при аппроксимации специальным законом Эрланга составляет 12.32%, а при аппроксимации смесью специальных законов Эрланга 3.56%.

Выводы. Очевидно, что использование смеси предложенных для аппроксимации распределений позволяют заменить закон Вейбулла при аналитическом моделировании, причем в этом случае будут совпадать не только математическое ожидание, но и дисперсия. Сравнивая свертки распределений, можно увидеть, что погрешность дисперсии возрастает в случае использования специального закона Эрланга, и становится отличной от нуля в случае использования смеси специальных законов Эрланга. Можно предположить, что для сверток более высокого порядка рост погрешности дисперсии будет еще значительнее. Однако предложенный способ аппроксимации смесью специальных законов Эрланга, не смотря на погрешность дисперсии сверток, позволяет существенно упростить аналитико-вероятностное моделирование технических систем.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 1.10513.2018/11.12), при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№18-01-00392а).

Библиографический список

1. Копп В.Я. «Моделирование автоматизированных производственных систем» Монография /В.Я.Копп // Севастополь: СевНТУ, 2012 – 700 с.

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

3.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.

4.Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. / В.С. Королюк, А.ф. Турбин Киев: Наук. думка.1982. 236 с.

5.Левин Б.Р. Справочник по надежности. — Справочник по надежности /Под ред. Левина Б.Р., в 3 томах, Т.1. М.: Мир, 1969 г., 339 с.. — М.: Мир, 1969. — С. 176. — 339 с.

6.Вентцель Е.С. Теория вероятностей. / Е.С. Венцель Учеб. для вузов. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.

7.Кокс Д. Р. Теория восстановления / Д.Р. Кокс, В.Л. Смит – М.: Сов. радио, 1967. – 298 с.

8.Кокс Д. Р. Теория очередей / Д.Р. Кокс, У.Л. Смит – М.: Мир, 1966. – 218 с.

9.Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.

Bibliograficheskij spisok

1.Kopp V.YA. «Modelirovanie avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem» Monografiya /V.YA.Kopp // Sevastopol': SevNTU, 2012 – 700 s.

2.Obzherin Yu.E. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. Elsevier, Academic press, USA, 2015. 214 p.

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

4.Korolyuk V.S. Protsessy markovskogo vosstanovleniya v zadachakh nadezhnosti sistem, Kiev, Naukova Dumka, 1982.

5.Levin B.R. Spravochnik po nadezhnosti. — Spravochnik po nadezhnosti/Pod red. Levina B.R., v 3 tomah, T.1. М.: Mir, 1969 g., 339 s.. — М.: Mir, 1969. — S. 176. — 339 s.

6.E.S. Venttsel. Teoriya veroyatnostey [The theory of chances], 6-th ed. Moscow, Vysshaya shkola, 1999.

7.Koks D. R. Teoriya vosstanovleniya / D.R. Koks, V.L. Smit – М.: Sov. radio, 1967. – 298 s.

8.Koks D. R. Teoriya ocheredey / D.R. Koks, U.L. Smit – М.: Mir, 1966. – 218 s.

9.Vadzinskiy R.N. Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam / R.N. Vadzinskiy – SPb.: Nauka, 2001. – 295 s.

Карташов Леонид Евгеньевич, канд. техн. наук, доц., ninakar@rambler.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

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

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

THE WEBULL'S LAW APPROXIMATION WITH ERLANG'S SPECIAL DISTRIBUTION BLENDS AND NORMALIZED DISTRIBUTION OF ERLANG

Kartashov L.E., Kopp V.Y., Zamoryonov M.V.

The approximation method of the Weibull's distribution law with blends of special Erlang's distributions and normalized Erlang's distributions was considered. The numerical examples were considered, the approximation error was determined, the variance errors were determined. Second-order convolutions were obtained for the laws proposed for approximation, and the variance errors for convolutions were determined.

Keywords: Modeling, Weibull distribution, Erlang distribution, approximation, convolutions.

Kartashov Leonid Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, ninakar@rambler.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

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

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

АЛГОРИТМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТАМИ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА

Скороход Б.А.¹, Жилияков П.В.²

Аннотация. Рассматривается задача слежения за физическими объектами по 2D изображениям, поступающим с видеокамеры, установленной на антропоморфной робототехнической платформе. Предполагается, что объекты находятся в рабочей зоне робота, под которой понимается область 3D пространства, достижимая его манипуляторами. Данные с видеокамеры представляют собой упорядоченную последовательность кадров в виде цветных изображений. Предложены алгоритмы обнаружения, классификации и видеосопровождения объектов, эффективность, которых тестирована на реальных данных.

Ключевые слова. обнаружение, классификация, видеосопровождение заданных предметов, антропоморфный робот, манипулирование предметами

Постановка задачи. Задачи управления роботами в автономных режимах, способных манипулировать предметами, широко обсуждаются в литературе в настоящее время [1]. При решении подобных задач одним из ключевых элементов является система технического зрения, позволяющая классифицировать предметы и следить за ними в видеопотоке. Вместе с тем, хорошо известно, что изображения содержат большое количество информации об объекте, но ее извлечение и интерпретация является трудной задачей, требующей анализа большого объема данных. Сложность интерпретации, в частности, связана с тем, что один и тот же объект может иметь множество изображений, которые при изменении ракурса и освещенности могут достаточно сильно отличаться друг от друга. Также плоские изображения не отображают в полной мере все трехмерные свойства физических предметов. В связи с этим, приложения нуждаются в алгоритмах обработки изображений, ориентированных на решение конкретных содержательных [2–5].

В данной работе рассматривается задача слежения за физическими объектами по 2D изображениям, поступающим с видеокамеры, установленной на антропоморфной робототехнической платформе (АРТП). Видеокамера установлена в голове АРТП. Предполагается, что объекты находятся в рабочей зоне АРТП, под которой понимается область 3D пространства, достижимая его манипуляторами. Данные с видеокамеры представляют собой упорядоченную последовательность кадров в виде цветных изображений. Предполагается их последовательная, покадровая обработка. Поток видео данных с камеры поступает на IP-порт в формате JPEG с разрешением 720p и частотой 25 кадров в секунду. Видеоданные получены с помощью компьютерного симулятора «Симулятор-У», предназначенного для реализации автономного

управления АРТП, отработки решения различных задач и обучения операторов управления АРТП SAR-400, приобретенного СГУ. Симулятор воспроизводит поведение антропоморфного робота, который выполняет различные манипуляции с предметами (гайковерт, зарядное устройство и др.). Пример одного кадра показан на **Рис.1**.



Рис.1 – Изображение одного кадра исходных видеоданных

Отметим следующие особенности видеоданных, существенно затрудняющих решение сформулированной задачи:

- некоторые предметы похожи друг на друга, но расположены в разных местах сцены (розетки: socket01, socket02, socket03, socket04);
- для некоторых предметов необходимо распознать только их части, а не сами предметы целиком (кабель: cableA, cableB);
- на предметы и возле них может падать тень от АРТП, что меняет освещенность предметов, создает дополнительные разрывы яркости на видеоизображении, тем самым усложняет обнаружение предметов;
- камера движется с переменной скоростью;
- в нескольких местах камера движется рывками, это происходит по причине частичной потери кадров при передаче видеоданных;
- на разных кадрах сцены присутствует разное количество предметов, не все предметы одновременно видимы;
- на разных кадрах предметы могут быть частично закрыты другими объектами;
- во время движения камеры предметы видны под разными углами, а также незначительно удаляются и приближаются.

Целью работы является разработка и исследование алгоритмов обнаружения, классификации и автоматического видеосопровождения заданных объектов для компьютерного симулятора «Симулятор-У» и последующего их применения в задачах управления АРТП SAR-400.

Задача обнаружения объектов. Изображенные на каждом кадре объекты можно разделить на два класса. Предметы (объекты), которые необходимо обнаружить и распознавать: гайковерт (screw); аккумуляторный блок (battery); четыре электрических розетки (socket01 - socket04); электрический кабель (cable). Фон – объекты, которые не требуют распознавания (руки робота и др.). Фон и предметы в совокупности называются

сценой. Под видео обнаружением понимается выделение объектов на общем фоне сцены без их распознавания. Решение задачи обнаружения позволяет обнаруживать на ней объекты. После обнаружения объекты последовательно нумеруются, в зависимости от расположения на кадре (слева на право, сверху вниз), но принадлежность объектов какому-либо классу не устанавливается.

Исходными данными алгоритма обнаружения являются отдельные кадры видеоданных, которые представлены в виде полноцветного изображения в пространстве RGB. Для решения задачи обнаружения объектов используются метод определения границ объектов через обнаружение разрывов яркости и морфологические операции над бинарными изображениями, на которых отображены границы объектов. Метод определения разрывов яркости позволяет определить границы объекта. В результате получается бинарное изображение с границами всех объектов на сцене. Результат в виде бинарного изображения позволяет применить морфологические операции для дальнейшего преобразования изображения. Морфологические преобразования применяются с целью ликвидации разрывов контуров, возникших в результате плавного изменения яркости; удаление лишних контуров, возникших в результате шума и не принадлежащих объектам; заливки у объектов внутренних областей с замкнутым контуром для создания фигуры, которая покрывает объект целиком и несет информацию о его форме и размерах.

Рис.2,3 иллюстрируют работу алгоритма.

Алгоритм обнаружения включает следующую последовательность операций:

- а) перевод исходного цветного изображения в полутоновое изображение;
- б) определение границ предметов (перепадов яркости) с помощью детектора границ Sobel (оператор Собеля);
- в) применение операции дилатация к бинарному изображению по сформированной бинарной градиентной маске для соединения небольших разрывов на границах;
- г) применение операции, заполнения пространства внутри объектов, если они имеют замкнутый контур;
- д) применение операции эрозия к бинарному изображению по сформированной бинарной градиентной маске для сглаживания границ объекта;
- е) применение операции удаления тонких линий с применением сформированной бинарной градиентной маски;
- ж) поиск объектов как связных областей пикселей и их нумерация.

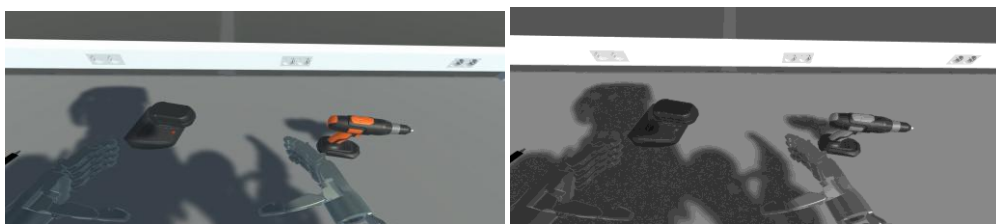


Рис.2 – Преобразование кадра видеоданных из полноцветного

изображения в полутоновое

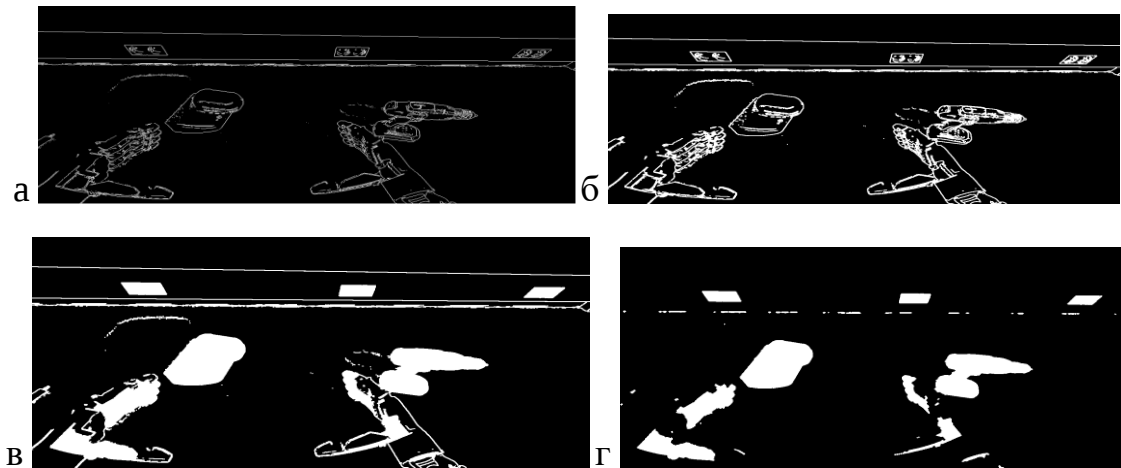


Рис.3 – Результат определения границ с помощью оператора Собеля (а). Результат применения операции дилатация (б). Результат применения операции заливки замкнутых контуров (в). Результат применения операции размыкания (г).

Алгоритм распознавания. Под распознаванием подразумевается определение класса выделенного объекта на основе принадлежащих каждому классу набора признаков. Использовались следующие интегральные геометрические признаки, позволяющие оценить форму, размеры и ориентацию объектов на изображении (соответствующие определения приведены в [6, 7]): площадь; периметр; округлость; периметры вписанных и описанных прямоугольников или окружности; компактность; относительная длина и ширина объекта; положение «центра массы» (энергетического центра) объекта; главные моменты – длины максимальной и минимальной осей инерции; эксцентриситет эллипса имеющего те же вторые моменты, что и объект.

Алгоритм распознавания классифицирует объекты на основе геометрических признаков. Каждый признак класса задан в виде диапазона значений. Набор из нескольких признаков класса образует прототип предмета. Если признаки выделенного объекта попадают в диапазоны значений прототипа, объект считается распознанным. Алгоритм работает с матрицей номеров объектов отдельного кадра видеоданных и включает следующую последовательность операций:

- а) определение геометрических признаков найденных объектов;
- б) распознавание объекта на основе сравнения признаков объекта с прототипами предметов;
- в) нахождение координат, размера и положения распознанного объекта.

Рис.4 иллюстрирует результат работы алгоритма. Показаны только распознанные предметы с ограничивающими прямоугольниками. Последний третий шаг алгоритма распознавания вычисляет координаты и размер объекта через определение координат ограничивающего объект прямоугольника. Координаты прямоугольника представлены в виде массива.

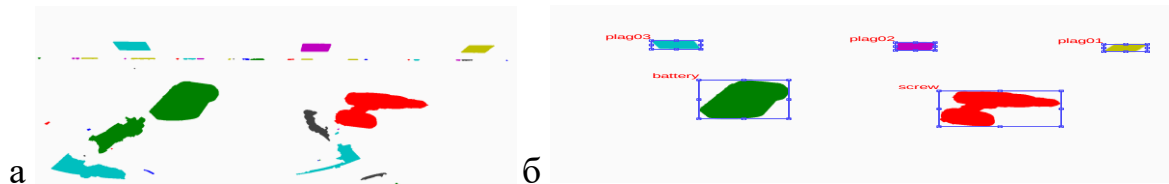


Рис.4 – Палитровое изображение, иллюстрирующее результат обнаружения объектов (а). Результат распознавания объектов (б).

Задача видеосопровождения. Под видеосопровождением понимается выделение объектов на видеопоследовательности после их обнаружения на первом кадре. Такая задача может быть решена путем сопоставления изображения, содержащего объект с шаблоном (эталоном). Для сопровождения объектов был выбран корреляционный метод сопоставления изображений, сравнивающий два изображения: сцену – общее изображение и шаблон (образец) - изображение предмета. В результате сопоставления на сцене находятся координаты места, где часть сцены близка к шаблону. Алгоритм распознавания предоставляет текущие координаты и размер предметов, найденные по предыдущему кадру. На основе этих данных вырезается шаблон из общего изображения (сцены).

Компьютерное моделирование. В таблице 1 приведены результаты обработки видеопоследовательности, включающей 2709 кадров, с помощью разработанных алгоритмов. Видно, что вероятность распознавания объектов в кадре не высокая – 17%. Несмотря на это, алгоритм видеосопровождения работает корректно в 69% случаев.

Таблица 1. – Статистические данные обработки

№	Название объекта	Количество кадров с полной видимостью объектов, n_i	Отношение $\frac{n_i}{N}, \%$, $N = 2709 -$	Распознавание		Сопровождение	
				количество случаев, r_i	$\frac{r_i}{n_i}, \%$	количество случаев, s_i	$\frac{s_i}{n_i}, \%$
1	screw	1107	41	208	19	936	85
2	battery	1369	51	192	14	1128	82
3	socket01	696	26	206	30	577	83
4	socket02	1538	57	233	15	486	32
5	socket03	1327	49	215	16	1163	88
6	socket04	492	18	81	16	336	68
7	cableA	1052	39	175	17	379	36
8	cableB	638	24	61	10	485	76
Среднее		-	38	-	17	-	69

Анализируя все проведенные эксперименты, можно отметить следующее:

- алгоритм обнаружения работает не стабильно для объектов, которые сливаются с фоном и имеют на своих границах малые перепады яркости, подобная проблема возникает при затенении объекта тенями;

- алгоритм обнаружения не может обнаружить части предметов (кабель: cableA, cableB), если весь предмет находится в зоне видимости;
- алгоритм распознавания работает не на всех участках движения камеры из-за сложности в определении признаков инвариантных к повороту, смещению и изменению масштаба объекта;
- алгоритм распознавания в некоторых случаях работает не корректно, если предметы похожи между собой (розетки: socket01, socket02, socket03, socket04), так как диапазоны признаков их прототипов пересекаются;
- алгоритм автосопровождения дает сбои при резких движениях камеры;
- алгоритм автосопровождения может давать сбои, если вплотную с объектом сопровождения находится другой объект.

Заключение. В работе были предложены алгоритмы слежения в видеопотоке за заданными объектами для симулятора «Симулятор-У» и последующего их применения в задачах управления АРТП SAR-400. Эффективность алгоритмов была подтверждена тестированием алгоритмов на реальных данных. В качестве направления дальнейших исследований отметим необходимость использования более продвинутых алгоритмов обработки изображений, включающих, в частности, алгоритмы глубокого обучения для повышения вероятности правильной классификации предметов и стереозрение для построения 3D карты рабочего пространства робота.

Исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57818X0264).

Библиографический список

1. Corke, P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB. – Springer Tracts in Advanced Robotics, 73. Springer, Berlin, 2011. – 669 p.
2. Schwarz M. RGB-D Object Detection and Semantic Segmentation for Autonomous Manipulation in Clutter/ M. Schwarz, A. Milan, A. Periyasamy, S. Behnke. International Journal of Robotics Research, Vol 37, Issue 4-5, 2018.
3. Wahrmann D. An Autonomous and Flexible Robotic Framework for Logistics Applications / D. Wahrmann, A. Hildebrandt, C. Schuetz, R. Wittmann, D. Rixen. Intell. Robot. Syst. 2017:1–13. doi: 10.1007/s10846-017-0746-8.
4. Zapata-Impata B.S. Using geometry to detect grasping points on 3D unknown point cloud / B. Zapata-Impata, C. Mateo, P. Gil, J. Pomares. Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics; Madrid, Spain. 26–28 July 2017; pp. 154–161.
5. Ten Pas A. Grasp Pose Detection in Point Clouds / P. Ten, M. Gualtieri, K. Saenko, R. Platt. Int. J. Robot. Res. 2017; 36:1455–1473. doi: 10.1177/0278364917735594.

6. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондарен А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
7. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Corke, P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB. – Springer Tracts in Advanced Robotics, 73. Springer, Berlin, 2011. – 669 p.
2. Schwarz M. RGB-D Object Detection and Semantic Segmentation for Autonomous Manipulation in Clutter/ M. Schwarz, A. Milan, A. Periyasamy, S. Behnke. International Journal of Robotics Research, Vol 37, Issue 4-5, 2018.
3. Wahrmann D. An Autonomous and Flexible Robotic Framework for Logistics Applications / D. Wahrmann, A. Hildebrandt, C. Schuetz, R. Wittmann, D. Rixen. Intell. Robot. Syst. 2017:1–13. doi: 10.1007/s10846-017-0746-8.
4. Zapata-Impata B.S. Using geometry to detect grasping points on 3D unknown point cloud / B. Zapata-Impata, C. Mateo, P. Gil, J. Pomares. Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics; Madrid, Spain. 26–28 July 2017; pp. 154–161.
5. Ten Pas A. Grasp Pose Detection in Point Clouds / P. Ten, M. Gualtieri, K. Saenko, R. Platt. Int. J. Robot. Res. 2017; 36:1455–1473. doi: 10.1177/0278364917735594.
6. Vizil'ter YU.V., Zheltov S.YU., Bondaren A.V., Ososkov M.B., Mopzhin A.V. Obrabotka i analiz izobrazheniy v zadachakh mashinnogo zreniya: Kurs lektsiy i prakticheskikh zanyatiy. – М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
7. Shapiro L., Stokman Dzh. Komp'yuternoye zreniye. – М.: Binom. Laboratoriya znaniy, 2006. – 752 с.

Скороход Борис Аркадьевич, д.т.н., проф., кафедра Информатики и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет, 33, ул. Университетская, Россия, 299053.

Жилияков Павел Владимирович, студент магистратуры, Севастопольский государственный университет, 33, ул. Университетская, Россия, 299053.

TRACKING ALGORITHMS FOR OBJECTS IN THE WORKING SPACE OF ANTHROPOMORPHIC ROBOT

Skorohod B.A., Zhilyakov P.V.

The task of tracking physical objects in 2D images coming from a video camera installed on an anthropo-morph robotic platform is considered. It is assumed that the objects are located in the working area of the robot, by which is meant the area of 3D space, achievable by its manipulators. The data from the video camera is an ordered sequence of frames in the form of color images. Algorithms for detection, classification and video tracking of objects, efficiency, which are tested on real data, are proposed.

Keywords: Detection, classification, video tracking of specified objects, anthropomorphic robot, manipulation of objects

Skorohod Boris Arkadievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, department of Informatics and Control in Technical Systems, boris.skorohod@mail.ru, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya Street, Russia, the city of Sevastopol, the index of 299053.

Zhilyakov Pavel Vladimirovich, graduate student, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya Street, Russia, the city of Sevastopol, the index of 299053.

УДК 681.2.08

ШИРОКОПРЕДЕЛЬНЫЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Васютенко А. П.¹, Тараховский А.Ю.²

Аннотация. *Приведен анализ характеристик пневматических преобразователей, сформулирована цель работы, представлена схема турбулентной струи и выражения, описывающие зависимость давления воздуха от расстояния между соплом и приемным каналом. Приводится схема установки и результаты исследования статических характеристик пневматического преобразователя типа «сопло – приемный канал» $P_k = f(x)$ давления воздуха в приемном канале преобразователя от зазора x между торцами сопла и приемного канала и дается оценка соответствия теоретических и экспериментальных зависимостей, значений прямолинейных участков и пневматических передаточных отношений.*

Ключевые слова. *Измерение, сопло, приемный канал, преобразователь, «сопло-приемный канал», статическая характеристика.*

Измерительные приборы совместно с автоматическими управляющими и исполнительными устройствами составляют техническую базу автоматизированных систем управления технологическими процессами. Основным направлением развития средств измерительной техники является разработка приборов для измерения геометрических параметров деталей с использованием преобразователей различных типов: пневматических, механических, электрических, магнитных, тепловых, оптических и других.

Пневматические преобразователи широко применяются для измерения геометрических параметров деталей в машинно-приборостроении. Известны различные виды первичных пневматических преобразователей в зависимости от конструкции измерительного сопла и заслонки: сопло-плоская заслонка, сопло-коническая заслонка, шариковое сопло-плоская заслонка, широкопредельный преобразователь плунжерного типа, эжекторное сопло. В работах [1,2] на основе анализа результатов моделирования статических характеристик показана возможность применения пневматических преобразователей типа, «сопло-приемный канал» для контроля геометрических параметров деталей, обеспечения более широкого диапазона измерения по сравнению с пневматическими преобразователями типа «сопло-заслонка». Пределы измерения преобразователя «сопло-заслонка» составляют $\Delta x = 0,02 \dots 0,17$ мм, а преобразователя «сопло – приемный канал» согласно результатам моделирования лежат в пределах $\Delta x = 0,4 \dots 0,9$ мм. Расширение пределов измерения пневматических преобразователей увеличивает область их использования и позволяет контролировать геометрические параметры

нескольких ступеней валиков приборных устройств при одной наладке измерительной оснастки.

Пневматические преобразователи типа «сопло-приемный канал» могут выполняться с глухой и проточной пневмокамерами.

В преобразователях с глухой пневмокамерой давление в ней определяется скоростным напором струи. Если же приемный канал проточный, то давление воздуха в нем зависит так же от пневмосопротивления нагрузки. $R_{\text{вых}}$ (Рис.1) С увеличением диаметра D_T приемного канала проточной камеры расход Q_K с начала растет, а затем уменьшается из-за возникающих противотоков в периферийной части канала.

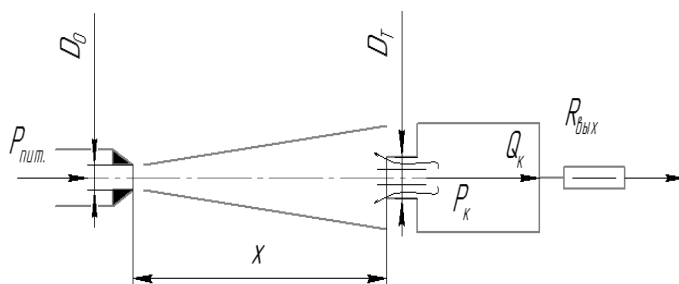


Рис.1 – Параметры схемы преобразователя «сопло – приемный канал» с проточной пневмокамерой

Теоретическая зависимость, описывающая работу преобразователя «сопло-приемный канал» с глухой пневмокамерой постоянного объема, получена на основе анализа трех аэрогидродинамических явлений: соударение струй, эффект Коанда и турбулизация ламинарного потока в результате воздействия внешних возмущений. При расчете преобразователя «сопло – приемный канал» с глухой пневмокамерой ($Q=0$) величина давления воздуха в ней $P_{k,Q=0}$ определяется при размещении приемного канала на основном участке

струи $\frac{x}{D_0} \geq 5$ из выражения

$$P_{kQ=0} = P_{num} \psi \left[c_1 - c_2 \left(\frac{D_T}{D_0} \right)^{1,5} + c_3 \left(\frac{D_T}{D_0} \right)^3 - c_4 \left(\frac{D_T}{D_0} \right)^{4,5} + c_5 \left(\frac{D_T}{D_0} \right)^6 \right], \quad (1)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{(0,3 + 0,14 \cdot \frac{x}{D_0})^2}; & c_2 &= c_1 \cdot \frac{0,81}{m^{1,5}}; \\ c_3 &= c_1 \cdot \frac{0,3}{m^3}; & c_4 &= c_1 \cdot \frac{0,0544}{m^{4,5}}; \\ c_5 &= c_1 \cdot \frac{0,0039}{m^6}; \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

ψ – коэффициент, учитывающий соотношение диаметров приемного канала и сопла ($\psi=1...1,4$); D_T – внутренний диаметр приемного канала;

$$m = \frac{1}{2} \cdot (1 + 0,304 \cdot \frac{x}{D_0}). \quad (3)$$

Приближенный расчет $P_{k,Q=0}$ может быть осуществлен после линеаризации формулы (1) на основании получаемого при этом соотношения:

$$P_{k,Q=0} = \psi \cdot P_{num} \cdot c_1 [1 - \frac{0,37}{m} \cdot \frac{D_T}{D_0}]. \quad (4)$$

При размещении приемного канала на начальном участке струи $\frac{x}{D_0} \leq 5$

величина давления воздуха в глухой приемной камере $P_{k,Q=0}$ находится из выражения:

$$P_{k,Q=0} = P_{num} \psi [c_1 - c_2 \cdot \frac{D_T}{D_0} + c_3 \cdot \frac{1}{(\frac{D_T}{D_0})} - c_4 \cdot \frac{1}{(\frac{D_T}{D_0})^2}], \quad (5)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 1 + \frac{1 - 0,2 \cdot \frac{x}{D_0}}{\frac{x}{D_0}}; & c_2 &= 1 + 0,0039 \cdot (\frac{x}{D_0})^3; \\ c_3 &= \frac{(0,5 - 0,1 \cdot \frac{x}{D_0})^2}{0,252 \cdot \frac{x}{D_0}}; & c_4 &= \frac{(0,5 - 0,1 \cdot \frac{x}{D_0})^3}{0,126 \cdot \frac{x}{D_0}}; \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

При постоянных значениях конструктивных параметров D_0 – диаметра сопла и D_T – внутреннего диаметра приемного канала, величина давления воздуха в глухой камере преобразователя является функцией расстояния x между торцами сопла и приемного канала $P_{k,Q=0} = f(x)$.

Сравнительный анализ моделирования и экспериментальных исследований статических характеристик широкопредельных пневматических преобразователей типа сопло-приемный канал позволяет оценить влияние некоторых допущений, принимаемых при выводе теоретических зависимостей, описывающих работу преобразователя (квазистационарность процессов, протекающих в устройствах, постоянство коэффициентов расхода,

неизменность величины рабочего давления воздуха, пренебрежение в ряде случаев влиянием теплообмена с окружающей средой) на его реальные характеристики.

Экспериментальная установка (**Рис.2**) спроектирована на базе стойки вертикального интерферометра и включает в себя: собственно стойку 1, регулируемый в вертикальном направлении с помощью винта 5, столик 6 и кронштейн 2 с хомутом 12. Кронштейн 2 служит для крепления измерительной головки 3 и входного сопла 7.

Дроссельный пневматический преобразователь типа «сопло – приемный канал» состоит из входного сопла 7 и приемного канала 8, который крепится на столике 6. Входное сопло 7 крепится в хомуте 12 и фиксируется при помощи винта 4, что обеспечивает возможность регулировки его начального положения. В свою очередь хомут крепится к стойке 1 посредством кронштейна 2. Для измерения величины зазора и линейных перемещений измерительного сопла или приемного канала вдоль оси преобразователя «сопло – приемный канал», используется многооборотная измерительная головка 3, которая так же крепится на кронштейне 2. Корпус приемного канала расположен на измерительном столике 6 и крепится к нему при помощи кронштейна 9. Вертикальное перемещение столика можно регулировать с помощью винтовой пары 5.

Подача сжатого воздуха во входное сопло 7 осуществляется от блока подготовки воздуха 11, который состоит из фильтра-влагоотделителя 17, регулятора-стабилизатора давления воздуха 16, манометра 15 и фильтра тонкой очистки 14. Для обеспечения достоверности экспериментальных данных в схеме установки используются высокоточные средства измерений, в частности образцовые манометры класса точности 1.0 и измерительная головка медель.1 МИГ (погрешность измерения 2,5 мкм, вариация показаний $\pm 0,5$ мкм).

На выходе блока подготовки воздуха установлен образцовый манометр 10. При изменении расстояния между измерительным соплом и приемным каналом меняется давление в приемной камере 13, которое фиксируется образцовым манометром 18. В таблице 1, указаны метрологические характеристики измерительной головки 3 и манометров 10 и 18.

Таблица 1.– Метрологические характеристики измерительных средств

Наименование	Модель	Пределы измерения	Погрешность
Манометр образцовый	11202	0...0,16 МПа	1,0%
		0...0,25 МПа	
Головка измерительная	1МИГ	0...1 мм	2,5 мкм

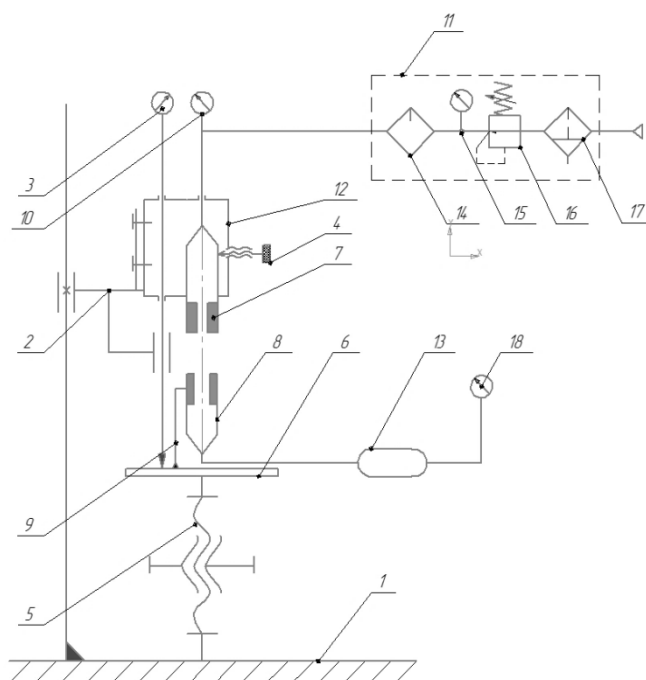


Рис.2 – Схема экспериментальной установки

Экспериментальные исследования проводились при следующих параметрах преобразователя: диаметр входного сопла $D_0=1,5\text{мм}$, диаметр приемного канала $D_T=4\text{мм}$, рабочее давление воздуха $P_{\text{num}}=0,1$ и $0,15\text{МПа}$.

Результаты исследования статических характеристик $P_k = f(x)$, пневматических передаточных отношений k_x и диапазонов измерения Δx представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. – Значения зависимости $P_k = f(x)$

$P_{\text{num}}, \text{МПа}$	$X, \text{мм}$					
	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Расчетные данные						
0,1	96700	10200	2660	7020	9300	10800
0,15	145050	45920	4000	10530	13950	16200
Экспериментальные данные						
0,1	62000	6400	6400	6000	6200	7300
0,15	102000	61400	5800	6100	6400	9500

Таблица 3. – Значения k_x и Δx

Вид данных	k _x , МПа/мм		Δx,мм	
	P _{num} , МПа			
	0,1	0,15	0,1	0,15
Расчетны	0,216	0,271	0,4	0,4
Экспериментальны	0,18	0,1	0,4	0,7

На **Рис.3,4** показаны теоретические и экспериментальные зависимости $P_k = f(x)$ давления воздуха P_k в приемном канале преобразователя от расстояния x между торцами сопла и приемного канала.

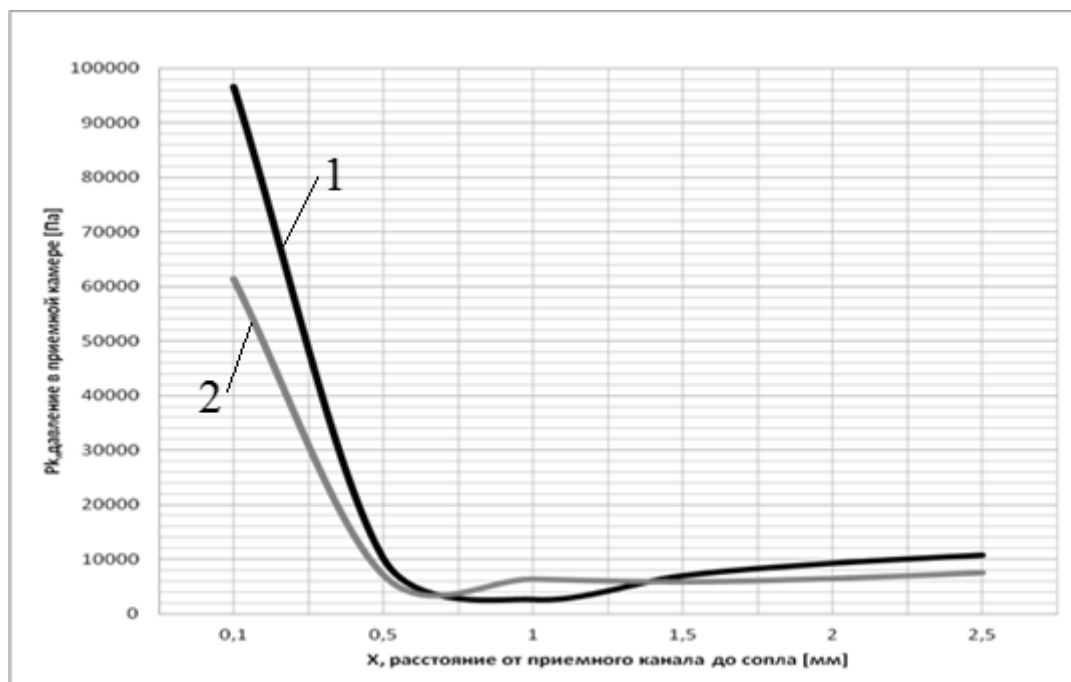


Рис.3 – Графики зависимости $P_k = f(x)$ при постоянном давлении $P_{nut}=0,1$ МПа, диаметре входного сопла $D_o=1,5$ мм и диаметре приемной камеры $D_T=4,0$ мм, где 1 – теоретическая зависимость, 2 – экспериментальная зависимость

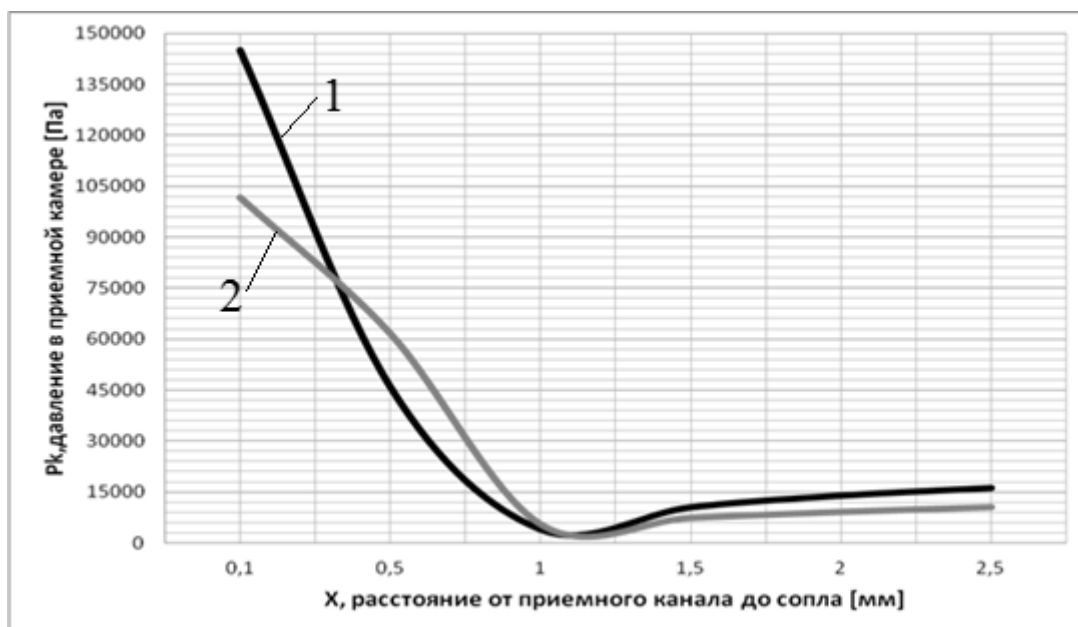


Рис.4– Графики изменения давления P_k зависимости от расстояния x , при постоянном давлении $P_{nut}=0,15$ МПа, диаметре входного сопла $D_o=1,5$ мм и диаметре приемной камеры $D_T=4,0$ мм, где 1 – теоретическая зависимость, 2 – экспериментальная зависимость

Выводы.

1. Сравнительный анализ графических зависимостей теоретических и экспериментальных данных показали удовлетворительные результаты их соответствия. Расхождение между теоретически рассчитанными и экспериментальными значениями давлений в приемной камере пневматического преобразователя не превысило 30—35% во всем диапазоне зазоров $x=0\ldots 0,9$ (мм) между входным соплом и приемным каналом на прямолинейном участке характеристики.

2. Значение пределов измерений Δx на прямолинейном участке теоретической и экспериментальной характеристик составили $\Delta x=0.4$ мм при давлении воздуха $P_{k,Q=0}=0,1$ МПа и $\Delta x=0.7$ при давлении $P_{k,Q=0}=0,15$ МПа. При этом пневматическое передаточное отношение составило $K_x=0,216$ МПа/мм при давлении питания $P_{k,Q=0}=0,1$ МПа и $K_x=0,268$ МПа/мм при давлении питания $P_{k,Q=0}=0,15$ МПа. Таким образом, увеличение давления питания $P_{k,Q=0}$ от 0,1 до 0,15 МПа позволило увеличить прямолинейный участок характеристики в 1.6 раза, а пневматическое передаточное отношение K_x в 1.25 раза.

3. В пневматических измерительных преобразователях типа «сопло - заслонка» значение пневматических передаточных отношений при рабочем давлении воздуха 0.1 МПа составляет $K_x=1,88 - 0,13$ МПа/мм, а при давлении 0,15 МПа $K_x=2,46 - 0,2$ МПа/мм. Результаты исследования показали что, передаточные отношения дроссельного пневматического преобразователя типа «сопло – приемный канал» соответствуют нижним пределам K_x пневматических измерительных преобразователей типа «сопло - заслонка». Пределы измерения Δx у преобразователей типа «сопло – заслонка» лежат в пределах 0,024-0,1мм (при $P=0,1$ МПа) и 0,04-0,130 мм (при $P=0,15$ МПа), а у преобразователей типа «сопло-приемный канал» 0,4-0,7 мм при $P=0,1$ и 0,15 МПа соответственно. Таким образом, применение преобразователей типа «сопло-приемный канал» позволяет в 4 раза увеличить прямолинейный участок характеристики.

Библиографический список

1. А. П. Васютенко, Дроссельный пневматический преобразователь «сопло-приемный канал» / А. П. Васютенко, Л. В. Ефремова, А.Ю.Тараховский// Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки, Том 3, North Charleston, USA, 12-13 декабря 2016г. с 109-114
2. Васютенко А.П. Моделирование характеристик пневматического преобразователя «сопло–приемный канал» / А.П. Васютенко, Л.В.Ефремова // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения материалы междунар. науч. - техн. конф. Севастополь, 11-15 сентября 2017 года. С. 122-124.
3. Елимелех И.М., Сидоркин Ю.Г. Струйная автоматика (пневмоника). Л., изд-во ЛЕНИЗДАТ, 1972. – 160с.
4. Залманзон Л. А. Пневмоника. М., Изд-во АН СССР, 1964. – 280с.

5. Элементы привода приборов. Расчет, конструирование, технологии [Электронный ресурс]: монография/ В.Е. Старжинский [и др.].— Электрон. текстовые данные.— Минск: Белорусская наука, 2012.— 769 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12331>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю

6. Элементы приборных устройств. Основной курс. в 2-х частях. Под ред. О.Ф. Тищенко. 13-М.: Высшая» школа, 2009.

7. Пашков Е.В. Электропневматика в производственных процессах: Учебное пособие/Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский, А.А. Четверкин; Под ред. Е.В. Пашкова.-2-е изд., перераб. и доп.-Севастополь:Изд-во СевНТУ,2003.-496с.:ил.

8. Ахмеджанов Р.А. Физические основы получения информации [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Ахмеджанов Р.А., Чередов А.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013.— 212 с.

9. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебн. пособие Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.

10. Шишмарев, В.Ю. Физические основы получения информации: учеб. пос./ В.Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2010. – 447 с.

11. Латышенко К.П. Метрология и измерительная техника на базе измерительных преобразователей ОВЕН [Электронный ресурс]: лабораторный практикум/ Латышенко К.П.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Вузовское образование, 2013.— 194 с.

Bibliograficheskii spisok

1. A. P. Vasyutenko, Drosselnyiy pnevmaticheskii preobrazovatel «soplo-priemnyiy kanal» / A. P. Vasyutenko, L. V. Efremova, A.Yu.Tarahovskiy// Fundamentalnaya nauka i tehnologii – perspektivnyie razrabotki, Tom 3, North Charleston, USA, 12-13 dekabrya 2016g. s 109-114

2. Vasyutenko A.P. Modelirovanie harakteristik pnevmaticheskogo preobrazovatelya «soplo–priemnyiy kanal» / A.P. Vasyutenko, L.V.Efremova // Avtomatizatsiya i priborostroenie: problemy, resheniya materialyi mezhdunar. nauch. - tehn . konf. Sevastopol, 11-15 sentyabrya 2017 goda. S. 122-124.

3. Elimeleh I.M., Sidorkin Yu.G. Struynaya avtomatika (pnevmonika). L., izd-vo LENIZDAT, 1972. – 160s.

4. Zalmanzon L. A. Pnevmonika. M., Izd-vo AN SSSR, 1964. – 280s.

5. Elementyi privoda priborov. Raschet, konstruirovaniye, tehnologii [Elektronnyiy resurs]: monografiya/ V.E. Starzhinskiy [i dr.].— Elektron. tekstovyye dannyye.— Minsk: Belorusskaya nauka, 2012.— 769 s.— Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/12331>.— EBS «IPRbooks», po parolyu

6. Elementyi pribornyyh ustroystv. Osnovnoy kurs. v 2-h chastyah. Pod red. O.F. Tischenko. 13-М.: Vysshaya» shkola, 2009.

7. Pashkov E.V. Elektropnevmatika v proizvodstvennyih protsessah: Uchebnoe posobie/E.V. Pashkov, Yu.A. Osinskiy, A.A. Chetverkin; Pod red. E.V. Pashkova.-2-e izd., pererab. i dop.-Sevastopol:Izd-vo SevNTU,2003.-496s.:il.

8. Ahmedzhanov R.A. Fizicheskie osnovyi polucheniya informatsii [Elektronnyiy resurs]: uchebnoe posobie/ Ahmedzhanov R.A., Cheredov A.I.— Elektron.

tekstovyye dannyye.— M.: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2013.— 212 s.

9. Goldshteyn A.E. Fizicheskie osnovyi izmeritelnykh preobrazovaniy: uchebn. posobie Tomsk: Izd-vo TPU, 2008. – 253 s.

10. Shishmarev, V.Yu. Fizicheskie osnovyi polucheniya informatsii: ucheb. pos./ V.Yu. Shishmarev. – M.: Akademiya, 2010. – 447 s.

11. Latyishenko K.P. Metrologiya i izmeritelnaya tehnika na baze izmeritelnykh preobrazovateley OVEN [Elektronnyy resurs]: laboratornyy praktikum/ Latyishenko K.P.— Elektron. tekstovyye dannyye.— Saratov: Vuzovskoe obrazovanie, 2013.— 194 s.

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

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

WIDE LIMIT PNEUMATIC CONVERTER

Vasyutenko A.P., Tarakhovsky A.Yu.

An analysis of the characteristics of pneumatic transducers is given, the purpose of the work is formulated, a diagram of a turbulent jet and expressions describing the dependence of air pressure on the distance between the nozzle and the receiving channel are presented. The installation scheme and the results of the study of the static characteristics of the pneumatic transducer of the nozzle-receiving channel type $P_k = f(x)$ of the air pressure in the receiving channel of the transducer from the gap x between the nozzle ends and the receiving channel are given, and an assessment of the correspondence of the theoretical and experimental dependencies to the values of straight sections is given and pneumatic gear ratios.

Keywords: Measurement, nozzle, receiving channel, transducer, "nozzle-receiving channel", Static characteristic.

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

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

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ ИДЕЙ

Карлов А.Г.¹

***Аннотация.** Представлен анализ ряда известных программных продуктов, поддерживающих процессы генерации изобретательских идей при создании концептуальных решений инновационных продуктов и технологий автоматизированных процессов в различных сферах промышленного производства. Обсуждается место и значимость подобного софта в процессах перехода от традиционного производства к системе передовых промышленных технологий (ППТ). Приведены примеры успешного применения перспективных программных продуктов, поддерживающих процессы генерации изобретательских идей на стадии создания концепта инновационного проекта.*

***Ключевые слова.** Концепт инновационного проекта, цифровые модели изделий и процессов, прорывные исследования и инновации, Теория решения изобретательских задач (ТРИЗ), Общая теория сильного мышления (ОТСМ), Алгоритм исправления проблемных ситуаций (АИПС), режим генеративных изобретений.*

Компьютерных программ в области методов решения изобретательских задач относительно немного, но они довольно широко распространены в мире. **Целью данного исследования** является анализ особенностей эволюции и применения компьютерных технологий, поддерживающих процессы генерации изобретательских идей, а также формулирование рекомендаций практикующим и начинающим изобретателям по поводу наиболее эффективного и доступного для широкого круга пользователей программного продукта из многих существующих на данном рынке.

Такие программы, как Invention Machine, Tech Optimizer, Gold Fire, семейство программ компании Ideation – активно используются практически во всех мировых компаниях, которые находятся на гребне конкуренции. Именно эти софты выступили в качестве проводников Теории Решения Изобретательских Задач (ТРИЗ) в большой мир, показали возможности ТРИЗ при устранении проблем компаний [1].

Первые попытки создать изобретательский софт были предприняты в начале восьмидесятых годов. Можно выделить две причины появления ТРИЗ-овского софта.

Первая – появились персональные компьютеры. Мысль о том, что положить процесс решения задачи на компьютерную программу, запрограммировать логику действий, оказалась плодотворной.

Вторая – ТРИЗ достигла уровня, вполне достаточного для решения изобретательских задач, чему накопились весомые подтверждения.

Оставалось только запрограммировать последовательность действий, и программа готова. Поскольку структура алгоритмов ТРИЗ и компьютерных программ во многом идентичны, создание тризовского софта представлялось сначала простым делом.

Было много попыток создания приемлемого тризовского софта. Однако большинство из них так и остались на уровне интерактивного учебника и записной книжки. Тризовские методы, хорошо проработанные на уровне инструментов, на практике не желали образовывать единую систему, применялись они, чаще всего, независимо друг от друга.

Перед разработчиками тризовского софта стояли две задачи.

- ✓ Первая и главная – это создание, продумывание эффективного, логичного и простого процесса решения задачи, который хорошо поддавался бы программированию.
- ✓ Вторая – это собственно программирование, построение компьютерной структуры тризовского алгоритма и набора эвристических инструментов, обеспечение диалога с пользователем, разработка дружественного интерфейса.

Интеллектуальные системы строились на основе выявленных в ТРИЗ объективных законов развития технических систем [1]. Именно следование законам развития дает возможность сделать конкурентоспособными выпускаемые продукты и разрабатываемые технологии. Это позволяет избежать многих дорогостоящих ошибок проектирования и повысить качественный уровень идей, определяющих главные показатели новой техники. Сейчас наблюдается тенденция позиционирования изобретательских софтов. Так, например, продукты проекта Invention Machine и компании Ideation – это сложные дорогостоящие программы, которые по силам приобрести только большой компании или университету. Для обычного пользователя эти софты недоступны по стоимости, а функциональность их избыточна. Кроме того, эти софты существуют только на английском языке и малополезны для русскоязычного пользователя.

В качестве примера русскоязычного софта для решения изобретательских задач, можно указать софтверный продукт «Новатор» компании «Метод», представляющий собой базу данных эффектов с системой выхода на нужный эффект по требуемой функции. Эта программа дает возможность получить большое число решений, представленных в виде эффектов, без их оценки и привязки к исходной ситуации, поэтому получается много информационного шума, то есть, большое число нереализуемых решений [2].

Исходя из этого, представляет интерес разработка простых версий изобретательского софта. Такие «софты» малоэффективны, поскольку предусматривают поддержку только малой части процесса решения задачи.

Кроме решательных софтов, существуют специальные софты для обучения ТРИЗ. Ниже кратко представим особенности и степень эффективности софтверных продуктов для решения изобретательских задач, которые можно найти на рынке.

Так, например, семейство систем "Изобретающая машина" (ИМ) является программным продуктом, предназначенным для поддержки решения сложных инженерно-изобретательских задач. Поддержка может осуществляться на самых ранних стадиях проектирования техники, когда производится выбор принципов действия и архитектуры будущей машины, устройства, т.е. на стадии синтеза концепта инновационного продукта или технологии. Основное достоинство и основная особенность рассматриваемой системы состоят в независимости заложенных в систему принципов от области техники. Семейство «Изобретающая машина» может применяться в любой области техники, связанной с обработкой веществ и полей, например, в машиностроении, электротехнике, микроэлектронике и т.д. Это подтверждается опытом эксплуатации системы на предприятиях различных отраслей: машиностроения, металлургии, электроники, химического машиностроения, самолетостроения, медицинской техники, строительства и др. [1,3,4].

Все системы семейства ориентированы на пользователей, не имеющих специальных знаний в области компьютерной техники. Пользователи системы – специалисты разных отраслей, имеющие дело с производством и созданием новой техники: инженеры, конструкторы, технологи, научные работники, патентоведы.

В целом система занимает самый верхний уровень в иерархии САПР. Развитие обычных САПР идет в сторону элементарной интеллектуализации, что приводит к появлению некоторых свойств, присущих экспертным системам (автоматическая генерация диалога, пояснение логического вывода и т.п.).

Эволюция подходов к «Изобретающей машине» отражает тенденции развития тризовского софта в мире. Так, в самом начале, версии ИМ 1.1 – 1.5 предусматривали диалог пользователя и компьютера. Компьютер задавал вопросы, помогая выстроить противоречие, пользователь отвечал на вопросы, используя в качестве подсказок инструменты ТРИЗ (Рис.1).

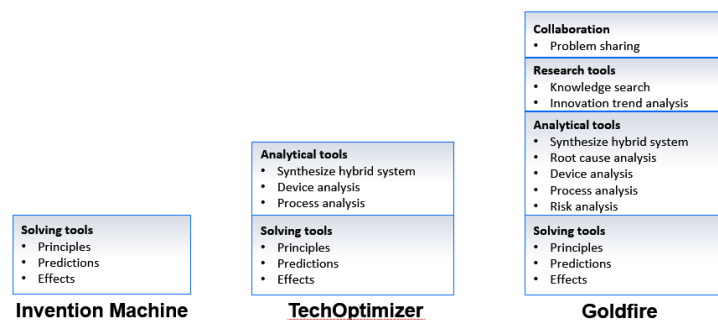


Рис.1. – Эволюция инструментов софта «Изобретающая машина» [1,3,5,6]

Такой софт хорошо работал с четко сформулированными задачами, но выяснилось, что его аналитическая часть слабовата. Поэтому следующие версии под названием TechOptimizer уже содержали элементы функционального и процессного анализа, однако диалог с пользователем был сведен к минимуму. Центр тяжести переносился на использование технической информации и эвристических инструментов [5].

Дальнейшим развитием идеи было создание новой версии софта – Gold Fire. Решательная часть софта не подвергалась значительным изменениям, развитие софта пошло в сторону усиления аналитической части и разработки новых модулей. Были добавлены модули семантического поиска информации и модель работы с пользователем по совместному решению проблем.

В настоящее время на рынке программных продуктов проекта Изобретающая Машина находится версия под названием Goldfire Innovator, принадлежащая компании IHS. Он поддерживает исследователей, как в разработке новых продуктов, так и в устранении недостатков или в разработке модифицированных свойств существующих продуктов и процессов [6].

Кроме этого имеется софт Innovation WorkBench, который имеет удобную навигацию, как между своими инструментами, так и другими приложениями, например, программным обеспечением Ideation Brainstorming 2.3. [7].

У многих разработчиков и пользователей в настоящее время сложилось представление, каким должен быть эффективный изобретательский софт.

Это должен быть софт-собеседник, умный партнер, который ведет пользователя по процессу решения задачи, не забегая вперед, учитывая все ответы пользователя и максимально автоматизируя его работу.

Компьютерная программа должна быть недорогой, доступной для широкого круга пользователей и в тоже время достаточно эффективной. Здесь нужно избежать двух крайностей – не упростить софт до примитивности, и не переусложнить его, алгоритм должен пошагово вести решателя от точки к точке, показывая, какой результат он должен получить после каждого шага.

Такое понимание процесса решения изобретательской задачи и было положено в основу алгоритма исправления проблемных ситуаций, АИПС [1,3]. Алгоритм был протестирован на компаниях SAMSUNG и POSCO (Южная Корея) при многолетней работе с практическими изобретательскими задачами из области микроэлектроники, полупроводников, металлургии, медицины, дисплеев различных типов, производства домашней техники и т.д. На его основе была разработана компьютерная программа Solving Mill. Это эффективный софтверный продукт для устранения проблемных ситуаций, простой и лёгкий в обучении и использовании.

В Страсбурге (Франция) 29-31 ноября 2018 года состоялась ежегодная международная конференция TRIZ-future 2018 (TFC-2018 Automated Invention for Smart Industries). Автор создателя «Изобретающей машины» В. Цуриков Его презентовал новый проект — True Machina. Он тоже связан с творчеством, но принципиально отличается от продуктов Invention Machine. True Machina будет творить конечный продукт. И это совсем другой вид творческого процесса. Компьютер не будет ждать, когда человек поставит очередную задачу. Он сам ее сформулирует и решит еще до вопроса разработчика. Это называется Generative Inventions [8].

Выводы:

- следует отметить недостаточно развитый рынок компьютерных продуктов поддержки процессов поиска ключевой изобретательской идеи;

- проведен анализ компьютерных программ в области методов решения изобретательских задач, их сравнение и предложены рекомендации по их применению при целевом изобретательстве;
- рекомендуется обратить внимание на программный продукт Solving Mill, показавший высокую эффективность решения реальных проблем высокотехнологичной промышленности;
- недавно презентован новый проект В. Цурикова — True Machina, который тоже связан с творчеством, но принципиально отличается от продуктов Invention Machine. True Machina будет творит конечный продукт.

Библиографический список

1. Шпаковский Н.А. ОТСМ-ТРИЗ: подходы и практика применения : учеб. пособие / Н.А. Шпаковский. — М.: ИНФРА-М, 2018. — 504 с. — (Высшее образование: Специалитет).
2. Изобретающая программа Новатор, версия 4.02. URL: <http://www.method.ru/>
3. Карлов А.Г., Шпаковский Н.А. Особенности алгоритмов решения изобретательских задач и софта для поддержки процессов проектирования средств автоматизации инструментами ОТСМ-ТРИЗ-технологий. Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. Научн. журнал. Выпуск №4 2018 г., с. 3-17.
4. Н. Петрович, В. Цуриков, Путь к изобретению (Десять шагов), М.: «Молодая гвардия», 1986, 222 с.
5. Руководство по установке TechOptimizer 4.0. URL: http://invention-machine.com/custsupport/to_install.cfm
6. Компьютерная программа Goldfire Innovator. URL: <http://park.by/it/project-84/type-full/>
7. Инновационные продукты TRIZSoft® компании Ideation International Inc. URL: <http://www.whereinnovationbegins.net/software/>
8. В. Цуриков. Творческий искусственный интеллект как равный партнер изобретателей. Материалы конференции TRIZ-future 2018 (TFC-2018 Automated Invention for Smart Industries), Strasbourg, France, 29-31 октября 2018. URL: <https://tfc2018.fr/keynote-speakers/>

Bibliograficheskiy spisok

1. Shpakovsky N.A. OTSM-TRIZ: approaches and application practice: studies. The grant / N.A.Shpakovsky. - M: INFRA TH, 2018. - 504 with. - (Higher education: Specialitet).
2. The inventing program the Innovator, the version 4.02. URL: <http://www.method.ru/>
3. Karlov A.G., Shpakovsky N.A. Feature of algorithms of the decision of inventive problems and a software for support of processes of designing of means of automation by tools of OTSM-TRIZ-TECHNOLOGIES. Automation and

measurements in machine-instrument making. Scientific mag. Release of #4, 2018, p. 3-17.

4. N. Petrovich, V. Tsurikov, Way to the invention (Ten steps), M: «Young guards», 1986, 222 с.

5. Guidance on installation of TechOptimizer 4.0. URL: http://invention-machine.com/custsupport/to_install.cfm

6. The computer program Goldfire Innovator. URL: <http://park.by/it/project-84/type-full/>

7. Innovative products TRIZSoft® of the company Ideation International Inc. URL: <http://www.whereinnovationbegins.net/software/>

8. V.Tsurikov. A creative artificial intellect as the equal partner of inventors. Conference materials TRIZ-future 2018 (TFC-2018 Automated Invention for Smart Industries), Strasbourg, France, October 29-31, 2018. URL: <https://tfc2018.fr/keynote-speakers/>

Карлов Антон Георгиевич, к.т.н., доцент, antkar38cam@gmail.com, Российская Федерация, г. Севастополь, ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Политехнический институт.

FEATURES OF EVOLUTION AND APPLICATION OF THE COMPUTER TECHNOLOGIES SUPPORTING PROCESSES OF GENERATION OF INVENTIVE IDEAS.

Karlov A.G.

The analysis of some the known software products supporting processes of generation of inventive ideas at creation of conceptual decisions of innovative products and technologies of automated processes in various spheres of industrial production is presented. The place and the importance of similar software in processes of transition from traditional manufacture to system of the advanced industrial technologies is discussed. Examples of successful application of the perspective software products supporting processes of generation of inventive ideas at a stage of creation of the innovative projects are resulted.

Key words: Concept of the innovative project, digital models of products and processes, disruptive researches and innovations, technology of innovative designing, theory of decision of inventive problems (TRIZ), the General theory of strong thinking (OTSM), Generative Inventions.

Karlov Anton Georgievich, Ph.D., the senior lecturer, antkar38cam@gmail.com, the Russian Federation, Sevastopol, the Sevastopol state university, Polytechnical institute.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Костина А.А.¹, Серов А.Н.², Левашов И.В.³

Аннотация. Исследуются особенности применения фазового сдвига сигнала напряжения при измерении реактивной мощности с помощью метода Буденау. Для реализации данного метода используется программный пакет LabView. Моделирование производится с целью оценки погрешности измерения реактивной мощности. Данная погрешность обусловлена выбором способа сдвига сигнала напряжения на фазу $\frac{\pi}{2}$: цифровой фильтр Гильберта, интегратор, дифференциатор.

Ключевые слова. Реактивная мощность, сдвиг по фазе, интегратор, дифференциатор, погрешность измерения реактивной мощности.

В настоящее время не существует общепринятого формального определения реактивной мощности для периодического сигнала. Одним из способов является метод Буденау. При таком методе реактивная мощность определяется по формуле [1]:

$$Q = \sum_{n=1}^N U_n \times I_n \times \sin \varphi_n.$$

где:

- U_n – действующее значение напряжения n-ой гармоники;
- I_n – действующее значение тока n-ой гармоники;
- φ_n – фазовый сдвиг между n-ми гармониками тока и напряжения;
- N – число гармоник.

Переходя во временную область, получаем [1]:

$$Q = \frac{1}{T_A} \int_0^{T_A} u'(t) \times i(t) dt.$$

где:

- T_A – время усреднения, кратное периоду сигнала;
- $i(t)$ – входной сигнал напряжения;
- $u'(t)$ – сигнал напряжения, сдвинутый на $\frac{\pi}{2}$ относительно входного сигнала напряжения $u(t)$.

Данное определение понятия реактивной мощности используется как для синусоидального сигнала, так и полигармонического сигнала.

Одной из причин возникновения погрешности при измерении реактивной мощности является сдвиг сигнала напряжения на фазу $\frac{\pi}{2}$. Оценка данной погрешности при различных способах сдвига проводилась с помощью программного пакета LabView.

Существует несколько способов сдвига сигнала на фазу $\frac{\pi}{2}$. Первый способ - это цифровой фильтр Гильберта. Преобразование Гильберта представляет собой идеальный фазовращатель, который осуществляет поворот фаз всех частотных составляющих на угол $\frac{\pi}{2}$.

На **Рис.1** изображены амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная характеристики (ФЧХ) фильтра Гильберта.

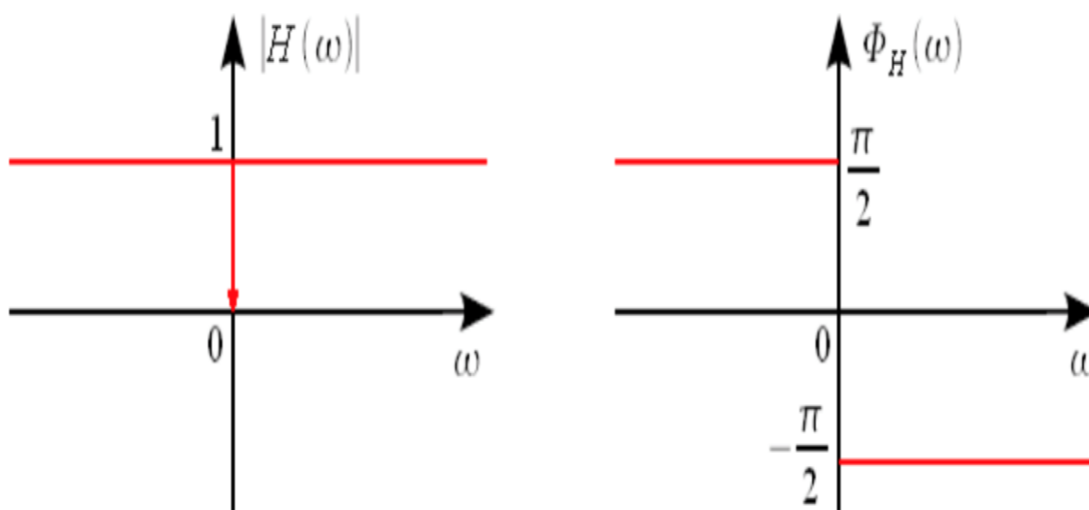


Рис.1 – АЧХ и ФЧХ фильтра Гильберта

Цифровой фильтр Гильберта представляет собой готовый блок в программной пакете LabView (**Рис.3**). На **Рис.3** изображен график входного сигнала напряжения (белый) и график сигнала, сдвинутый на фазу $\frac{\pi}{2}$ с помощью фильтра Гильберта (красный).

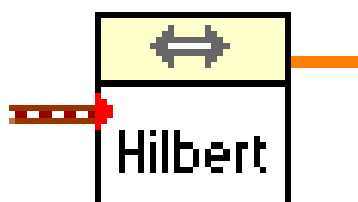


Рис.2 – Фильтр Гильберта в программе LabView

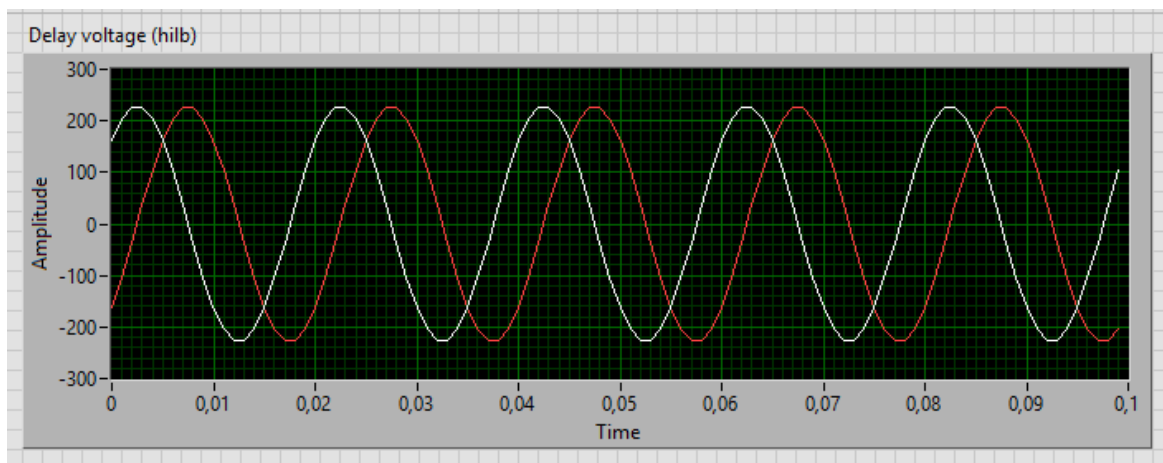


Рис.3 – Реализация фильтра Гильберта

Второй способ сдвига сигнала на фазу $\frac{\pi}{2}$ – использование интегратора. АЧХ и ФЧХ интегратора (рисунок 4) описываются следующими формулами:

$$H(\omega) = \frac{1}{\omega} \quad - \text{АЧХ}$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} \quad - \text{ФЧХ}$$

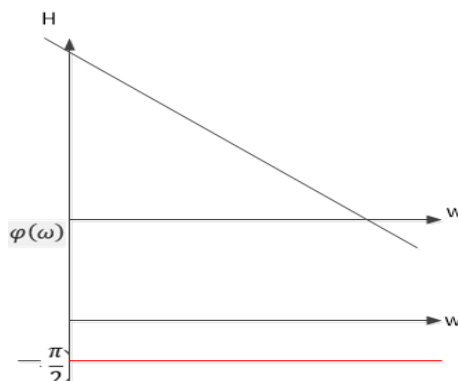


Рис.4 – АЧХ и ФЧХ интегратора

Сигнал, полученный на выходе интегратора, описывается как [2]:

$$u[n] = \frac{U_m}{\omega} \sin\left(n\omega T_s + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) \times K_{\text{сог}}. \quad (1)$$

В формуле (1) используется коэффициент согласования ($K_{\text{сог}}$), предназначенный для масштабирования сигнала, полученного на выходе интегратора.

Так как при различных значениях частоты, коэффициент передачи интегратора будет различным, необходимо показать каким образом была можно вычислить коэффициент согласования.

$$K_{\cos} = \frac{U_{m, \text{вых}}}{U_{m, \text{вх}}} \quad (2)$$

где:

- $U_{m, \text{вых}}$ – амплитудное значение сигнала на выходе интегратора;
- $U_{m, \text{вх}}$ – амплитудное значение входного сигнала интегратора.

Амплитудное значение сигнала на выходе интегратора определяется как разность максимального и минимального значений сигналов на выходе интегратора, деленное пополам. Реализация интегратора в программном пакете LabView показана на **Рис.5**.

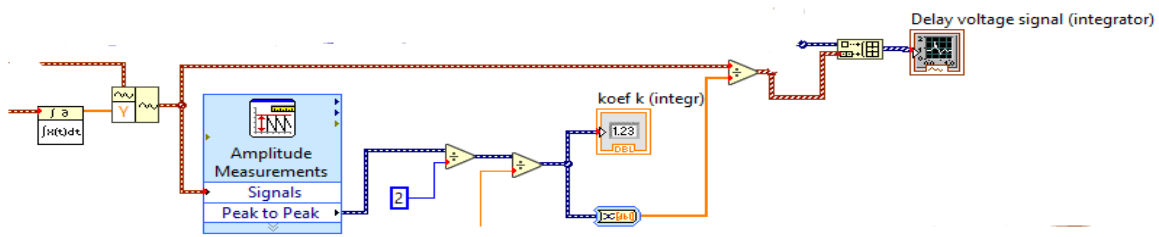


Рис.5 – Интегратор в программе LabView

На выходе интегратора получаем сигнал напряжения, сдвинутый относительно входного сигнала напряжения на фазу $\frac{\pi}{2}$ (красная линия на **Рис.6**). При использовании коэффициента согласования удалось выполнить масштабирование амплитуды выходного сигнала, однако сдвиг сигнала по оси напряжения устранить не удалось.

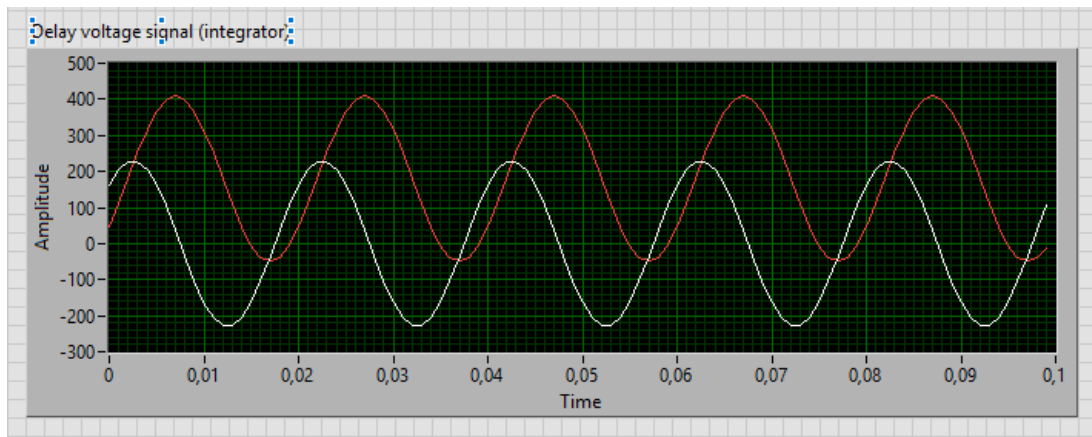


Рис.6 – Реализация интегратора

Третий способ сдвига сигнала на фазу $\frac{\pi}{2}$ – дифференциатор. АЧХ и ФЧХ дифференциатора (**Рис.7**) описываются формулами:

$$H(\omega) = \omega \text{ - АЧХ}$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} \text{ - ФЧХ}$$

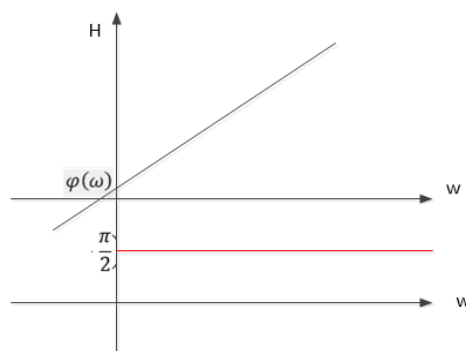


Рис.7 – АЧХ и ФЧХ дифференциатора

Сигнал, полученный на выходе дифференциатора, выражается следующей формулой [2]:

$$u[n] = U_m \omega \sin\left(n\omega T_s + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) \times K_{\text{coz}}. \quad (3)$$

В формуле (3) используется коэффициент согласования (K_{coz}), предназначенный для масштабирования сигнала, полученного на выходе дифференциатора. Данный коэффициент вычисляется по формуле (2), помноженной на -1.

Реализация дифференциатора в программном пакете LabView показана на **Рис.8**.

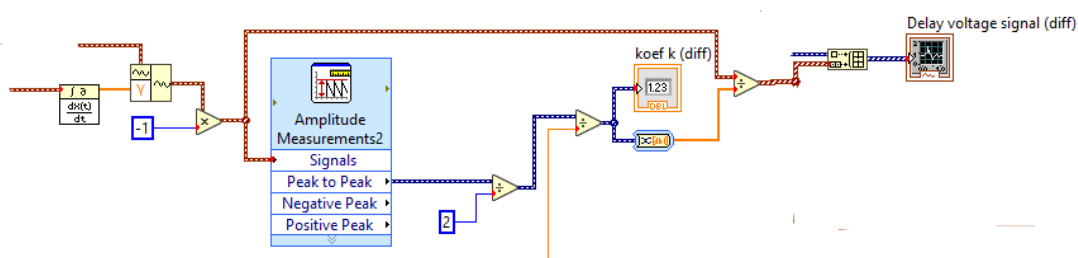


Рис.8 – Дифференциатор в программе LabView

На выходе дифференциатора получаем сигнал напряжения, сдвинутый относительно входного сигнала напряжения на фазу $\frac{\pi}{2}$ (**Рис.9** красный график). Данный метод позволяет менее точно выполнить масштабирование амплитуды выходного сигнала по сравнению с предыдущим методом.

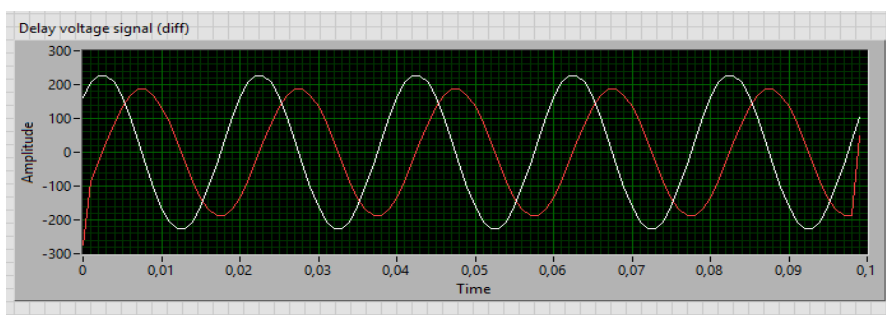


Рис.9 – Реализация дифференциатора

При реализации метода измерения реактивной мощности в программном пакете LabView возникает погрешность. В данном случае эта погрешность обусловлена выбором способа сдвига сигнала напряжения на фазу $\frac{\pi}{2}$, относительно сигнала тока.

Для вычисления погрешности измерения реактивной мощности используется следующая формула:

$$\delta = \frac{Q_{mes} - Q_{et}}{Q_{et}} \times 100\% \quad (4)$$

где:

- Q_{mes} – измеренное значение реактивной мощности;
- Q_{et} – эталонное значения реактивной мощности.

Эталонное значение реактивной мощности вычисляется по формуле [1]:

$$Q_{et} = \frac{U_m I_m}{2} \sin(\varphi).$$

где:

- U_m, I_m – амплитудные значения сигналов напряжения и тока;
- $\sin(\varphi)$ – синус фазового сдвига между сигналами напряжения и тока.

Далее покажем полученные значения погрешности измерения реактивной мощности, рассчитанной по формуле (4), при различных способах сдвига сигнала напряжения (таблица 1).

Таблица 1 – Погрешность измерения реактивной мощности

Метод реализации	Погрешность измерения реактивной мощности
Фильтр Гильберта	$2.13 \times 10^{-5} \%$
Интегратор	0.25%
Дифференциатор	0.43%

Наиболее точное выполнение сдвига сигнала напряжения на фазу $\frac{\pi}{2}$ обеспечивает фильтр Гильберта. Как видно из таблицы 1, погрешность измерения реактивной мощности так же принимает наименьшее значение при использовании фильтра Гильберта.

Библиографический список

1. Серов, А.Н. Разработка и исследование прибора для измерения показателей качества электроэнергии с повышенной точностью: диссертация кандидата технических наук: место защиты: Национальный исследовательский университет МЭИ. – Москва, 2016. – 397с.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М: Мир, 1978 – 834с.

Bibliograficheskiy spisok

1.Serov, A.N. Razrabotka i issledovanie pribora dlya izmereniya pokazateley kachestva electroenergy s povyshennoy tochnostyu: dissertaciya kandidata technicheskikh nauk: mesto zashytu: MEI. - Moscow, 2016.-397s.

2.Rabiner L., Gould B. Teoriya i primeneniye cifrovoy obrabotki signalov. – M: Mir, 1978 – 834s.

Костина Анна Андреевна, магистр, anya300396@yandex.ru, Россия, Национальный исследовательский университет «МЭИ» 111250, Россия, Москва, Красноказарменная 14

Серов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, serov.an.iit@yandex.ru, Национальный исследовательский университет «МЭИ» 111250, Россия, Москва, Красноказарменная 14

Левашов Игорь Владимирович, магистр, dolphinig@ya.ru, Национальный исследовательский университет «МЭИ» 111250, Россия, Москва, Красноказарменная 14

THE PECULIARITIES OF THE PHASE SHIFT AT THE REACTIVE POWER MEASUREMENT

Kostina A.A., Serov A.N., Levashov I.V.

The peculiarities of the application of the phase shift of the voltage signal at the reactive power measurement with using the Budenau method are investigated. The LabView software is used for this method realization. The purpose of this modeling is estimation of reactive power measurement error. This error is due to the choice of the method of shifting the voltage signal by $\pi/2$ phase.: digital Hilbert filter, integrator, differentiator.

Key words: Reactive power, phase shift, integrator, differentiator, reactive power measure error.

Kostina Anna Andreevna, magister, anya300396@yandex.ru, Moscow Power Engineering Institute 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14.

Serov Andrey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, serov.an.iit@yandex.ru, Moscow Power Engineering Institute 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14.

Levashov Igor Vladimirovich, magister, dolphinig@ya.ru, Moscow Power Engineering Institute 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ, ОСНОВАННОГО НА ПЕРЕХОДАХ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ НУЛЬ

Левашов И.В.¹, Серов А.Н.², Костина А.А.³

Аннотация. *Исследуются особенности реализации метода измерения частоты, основанного на переходах сигнала через ноль. Для реализации данного метода используются программные пакеты Matlab Simulink и Matlab. Моделирование производится с целью оценки погрешности измерения частоты. Для уменьшения погрешности измерения используется метод линеаризации вблизи переходов сигнала через ноль. Для устранения зависимости используемого метода от шумов входного напряжения, реализуется фильтр скользящего среднего.*

Ключевые слова. *Погрешность измерения частоты, линеаризация, фильтр скользящего среднего, переход через ноль.*

Существует множество различных цифровых методов измерения частоты [1][2]. Данные методы можно разделить на три категории: представление сигнала во временной области, представление сигнала в частотной области, а также комбинированные методы представления сигнала.

Метод измерения частоты, основанный на переходах сигнала через ноль, относится к методам, основанным на представлении сигнала во временной области.

Суть данного метода состоит в определении моментов перехода входным сигналом через ноль за время измерения и последующего расчёта значения частоты. Момент перехода через ноль будет определяться по изменению знака отсчётов входного сигнала – напряжения.

Общая формула для вычисления значения частоты будет иметь вид [3]:

$$f_1 = \frac{M}{t_{cz,M} - t_{cz,1}}. \quad (1)$$

• $t_{cz,1}$ - время первого перехода через ноль входным сигналом за рассматриваемое время;

• $t_{cz,M}$ - время последнего перехода через ноль входным сигналом за рассматриваемое время;

• M - количество переходов через ноль за время измерения.

Моменты времени перехода через ноль должны соответствовать одному типу пересечения, в нашем случае это изменение знака напряжения с отрицательного на положительный. Таким образом, переход через ноль определяется по изменению знака отсчёта с отрицательного на положительный.

Для реализации исследуемого метода в программе Matlab Simulink [4] была смоделирована схема, представленная на **Рис.1**.

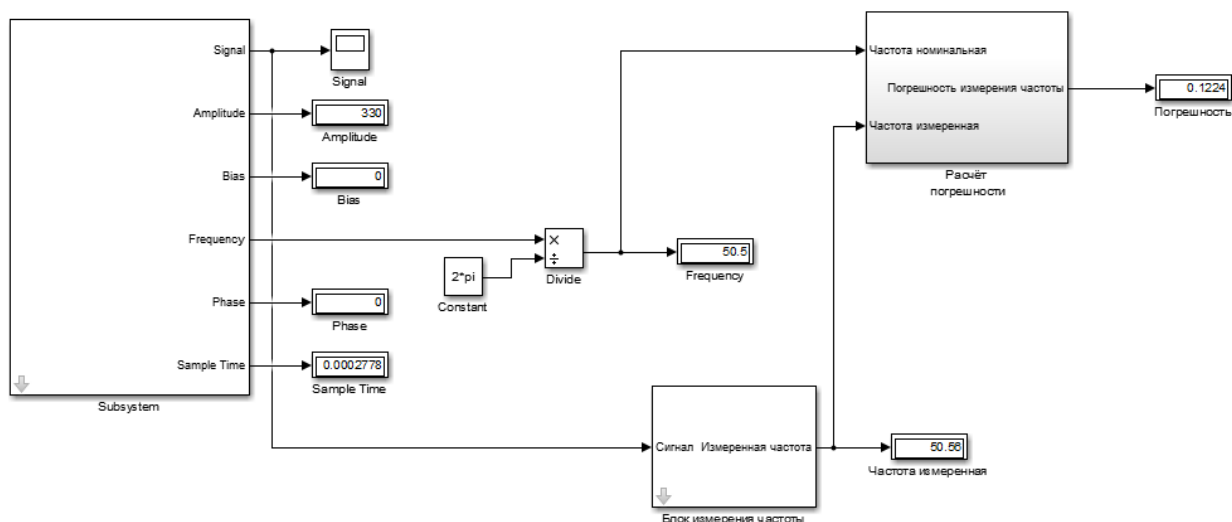


Рис.1 – Схема моделирования расчета частоты методом по переходу сигнала через нуль

Представленная схема состоит из следующих блоков:

- Блок генератора сигнала, с возможностью изменения параметров генерируемого сигнала;
- Блок измерения частоты;
- Блок расчёта погрешности измерения частоты.

На **Рис.2** показана схема блока измерения частоты, реализующего формулу (1). Для реализации данной формулы используются блоки:

- «счётчик числа переходов через 0» - рассчитывает количество переходов сигналом через нуль, за всё время измерения;
- «время первого перехода» - определяет время первого перехода сигналом через нуль;
- «время последнего перехода» - определяет время последнего перехода сигналом через нуль;

На выходе данного блока будет получено измеренное значение частоты входного сигнала.

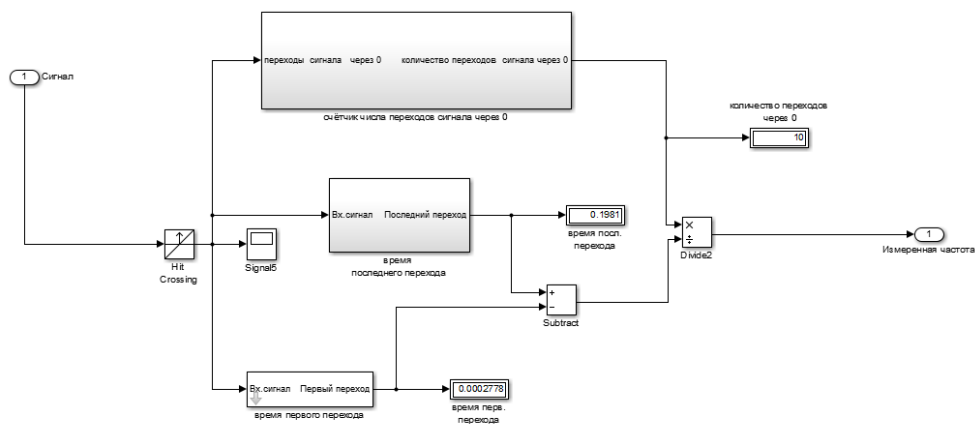


Рис.2 – Блок измерения частоты

Для расчета погрешности, вызванной отклонением частоты входного сигнала от эталонного значения, используется следующая формула [5]:

$$\delta = \frac{f_{изм} - f_{эм}}{f_{эм}} \times 100\% . \quad (2)$$

где:

- $f_{изм}$ – измеренное значение частоты входного сигнала;
- $f_{эм}$ – эталонное значения частоты входного сигнала.

На **Рис.3** показана схема блока, рассчитывающего погрешность измерения частоты. На вход данного блока подаётся измеренное значение частоты входного сигнала, а также номинальное значение частоты входного сигнала, заданное на генераторе. На выходе блока будет получена рассчитанная по формуле (2) погрешность.

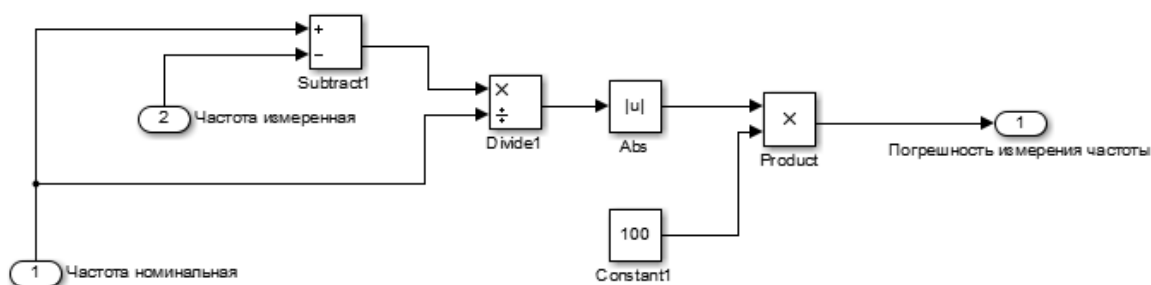


Рис.3 – Схема блока расчета погрешности измерения частоты

Линеаризация входного сигнала, а также фильтр "скользящего среднего" были выполнены в программном пакете Matlab [6].

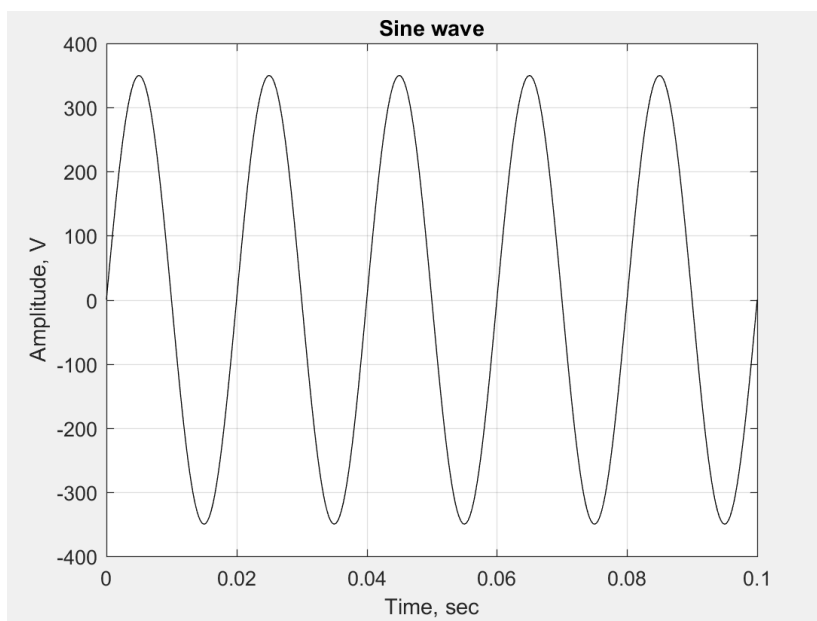


Рис.4 – Входной сигнал

Полученный сигнал, представленный на **Рис.4**, является массивом из «i» элементов. Элементы массива обрабатываются с целью нахождения переходов

сигнала через нуль. Для получения параметров $t_{cz,1}$, $t_{cz,M}$, равных времени первого и последнего переходов сигнала через нуль, происходит обработка значений массива. Каждый элемент массива может быть больше, меньше, или равен нулю. При нахождении элемента, равного нулю, проверяются соседние элементы. Если последующие элементы больше нуля, а предыдущие меньше, следовательно, произошёл переход сигнала через нуль. В этом случае счётчик переходов сигналом через нуль увеличивается на 1, а полученный момент времени записывается как $t_{cz,1}$, если же $t_{cz,1}$ уже было определено, то полученный момент времени записывается как $t_{cz,M}$. При дальнейшем нахождении перехода сигнала через нуль, значение $t_{cz,M}$ перезаписывается. Также имеется возможность того, что первый элемент массива равен нулю, а следующий за ним элемент больше нуля. Такой момент времени будет записан как $t_{cz,1}$. Так как сгенерированный сигнал дискретизирован с определённой частотой, следовательно, возможна ситуация, когда i -ый элемент массива будет меньше нуля, а $(i+1)$ -ый элемент массива больше нуля. В таком случае счётчик переходов сигнала через нуль увеличивается на 1, а точное значение времени перехода определяется с помощью использования метода линейаризации входного сигнала. Графическое представление данного метода показано на **Рис.5**.

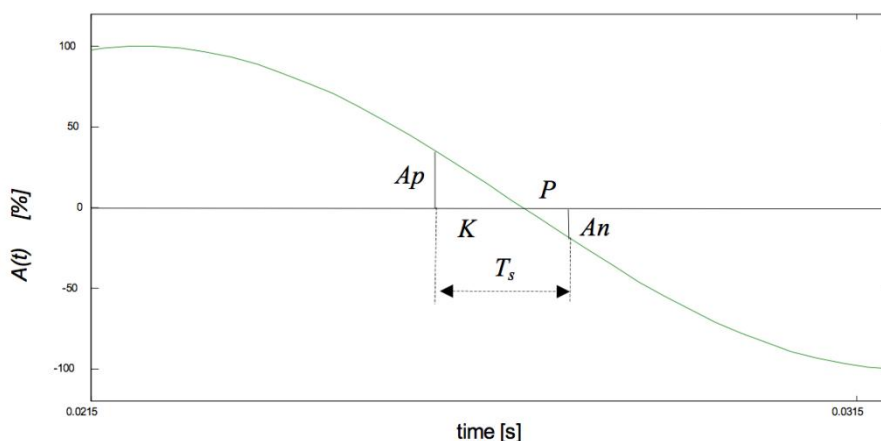


Рис.5 – Линейаризация входного сигнала

Коэффициенты, позволяющие определить момент прохождения входного сигнала через нуль, определялись с помощью следующих формул [7]:

$$\begin{aligned} \frac{A_p}{K} &= -\frac{A_n}{P} \\ P &= -\frac{A_n}{A_p - A_n} \\ K &= \frac{A_p}{A_p - A_n} \end{aligned} \quad (3)$$

Так как моменты времени, при которых сигнал принимает отрицательное (A_n) и положительное (A_p) значения, известны, время перехода сигналом через нуль можно определить по следующей формуле:

$$T_k = T_d + (T_p - T_d) * K.$$

В данной формуле:

- T_k – уточнённое время перехода сигналом через нуль;
- T_d – момент времени до пересечения нуля входным сигналом;
- T_p – момент времени после пересечения нуля входным сигналом;
- K – коэффициент, рассчитанный по формуле (3);
- Значение $(T_p - T_d)$ численно равно периоду дискретизации исследуемого сигнала.

Одним из недостатков исследуемого метода является зависимость от шумов входного напряжения. Для анализа влияния шумов входного напряжения на погрешность измерения частоты, программно был реализован сигнал, имеющий шумовую составляющую. Данный сигнал представлен на **рис.6** красным цветом, синим цветом представлен график синусоидального сигнала без шумовой составляющей.

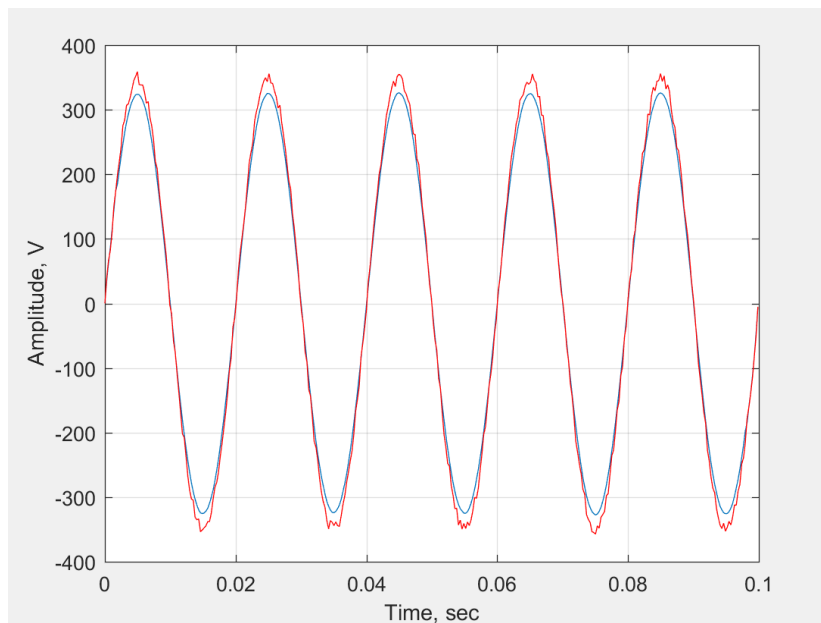


Рис.6 – График входного сигнала с шумовой составляющей (красная линия)

При измерении частоты сигнала с шумовой составляющей методом, основанном на переходах сигнала через нуль, происходило возникновение ложных переходов, что приводило к увеличению погрешности измерения частоты.

Для устранения шумовой составляющей, приводящей к возникновению ложных переходов, было произведено сглаживание входного сигнала методом

скользящей средней. В этом случае новое (сглаженное) значение сигнала определялось из следующего выражения:

$$y_j = \frac{y_{i-\left(\frac{n}{2}\right)} + \dots + y_i + \dots + y_{i+\left(\frac{n}{2}\right)}}{n}. \quad (4)$$

В выражении (4):

- y_j – усреднённое значение отсчёта;
- n – количество точек, по которым производится усреднение (рассчитывается программно);
- $y_{i-\left(\frac{n}{2}\right)}$ – точки, лежащие до значения точки, усреднение которой производится;
- $y_{i+\left(\frac{n}{2}\right)}$ – точки, лежащие после значения точки, усреднение которой производится;
- y_i – точка, усреднение которой производится.

На **Рис.7** представлен график, полученный после применения описанного выше метода.

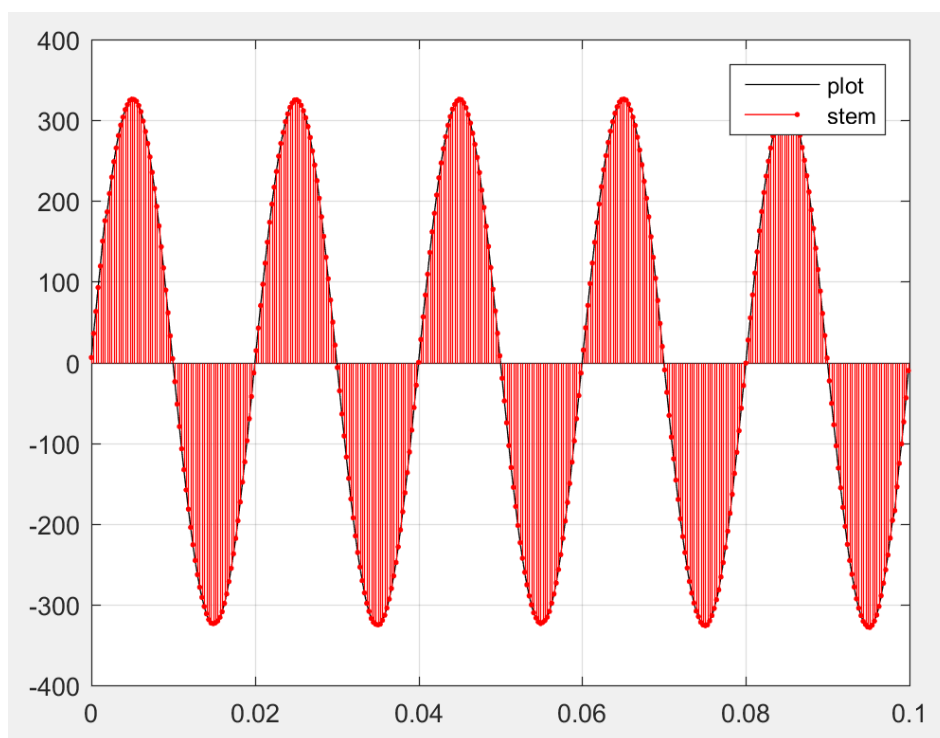


Рис.7 – График входного сигнала, восстановленного методом скользящей средней

Моделирование в программе Matlab позволило оценить влияние использования линеаризации вблизи переходов сигнала через нуль, а также

влияние фильтра скользящего среднего на погрешность измерения частоты исследуемым методом.

В таблице 1 приведена погрешность измерения частоты, полученная при различных подходах к реализации исследуемого метода.

Таблица 1. – Погрешность измерения частоты

Метод реализации	Погрешность измерения частоты
Simulink	0.12%
Matlab (синусоидальный сигнал)	0.29%
Matlab (синусоидальный сигнал с линеаризацией)	$4.02 \times 10^{-5}\%$
Matlab (синусоидальный сигнал с шумом)	49.98%
Matlab (синусоидальный сигнал с шумом, с линеаризацией и фильтром скользящего среднего)	0.33%

Полученные в таблице 1 результаты показывают значения погрешности, полученные при различных реализациях исследуемого метода, а также при различных входных сигналах. Линеаризация сигнала позволяет уменьшить погрешность, как при исследовании синусоидального сигнала, так и при исследовании сигнала с шумовой составляющей. Фильтр скользящего среднего, реализованный для синусоидального сигнала с шумом, позволяет исключить ложные переходы сигналом через нуль, что также значительно уменьшает значение погрешности измерения методом, основанным на переходах сигналом через нуль.

Моделирование в программных пакетах Matlab и Matlab Simulink позволило оценить зависимость погрешности измерения частоты от применяемых при измерении методов фильтрации и линеаризации сигналов.

Библиографический список

- 1.Белецкая, С.Ю. Измерение частоты гармонического сигнала методом сравнения с эталонами / С.Ю. Белецкая, Д.С. Гнездилов, И.Б. Крыжко, А.Б. Токарев // Журнал Вестник Воронежского государственного университета. – 2014. – Т.10. – №1. – С. 85–87.
- 2.Begovic, M.M. Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics / M.M. Begovic, P.M. Djuric, S. Dunlap, A.G. Phadke // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Т.8. – №2. – С. 480–486.
- 3.Серов, А.Н. Разработка и исследование прибора для измерения показателей качества электроэнергии с повышенной точностью: диссертация кандидата технических наук: место защиты: Национальный исследовательский университет МЭИ. - Москва, 2016.-397с.
- 4.Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7. Самоучитель. – М.:ДМК-Пресс, 2008. – 784с.

5.Каримова, Н.О. Оценка погрешностей использованных методик и аппаратуры // Молодой ученый. — 2018. — №23. — С. 207-209.

6.Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.:ДМК-Пресс, 2017. – 768с.

7.Milenko, B. Đurić Combined Fourier and Zero Crossing Technique for Frequency Measurement in Power Networks in the Presence of Harmonics /Milenko B. Đurić, Željko R. Đurišić // The Renewable Energy & Power Quality Journal. – 2005. – T.1. – №3. – С. 463–469.

Bibliograficheskiy spisok

1.Beleckaya, S.Yu. Izmerenie chastoti garmonicheskogo signala vetodom sravneniya s etalonami / S.Yu. Beleckaya, D.S. Gnezdilov, I.B. Krizhko, A.B. Tokarev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2014. – T.10. – №1. – С. 85–87.

2.Begovic, M.M. Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics / M.M. Begovic, P.M. Djuric, S. Dunlap, A.G. Phadke // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – T.8. – №2. – С. 480–486.

3.Serov, A.N. Razrabotka i issledovanie pribora dlya izmereniya pokazateley kachestva electroenergii s povyshennoy tochnostyu: dissertaciya kandidata technicheskikh nauk: mesto zashytu: MEI. - Moscow, 2016.-397s.

4.Dyakonov V.P. Simulink 5/6/7. Samouchitel. – М.:DMK-Press, 2008. – 784s.

5.Karimova, N.O. Ozenka pogreshnostey ispolzuemux metodicheskix i apparatury // Molodoy uchenyy. – 2018. – №23. – С. 207-209.

6.Dyakonov V.P. Matlab. Polnuy samouchitel. – М.:DMK-Press, 2017. – 768s.

7.Milenko, B. Đurić Combined Fourier and Zero Crossing Technique for Frequency Measurement in Power Networks in the Presence of Harmonics /Milenko B. Đurić, Željko R. Đurišić // The Renewable Energy & Power Quality Journal. – 2005. – T.1. – №3. – С. 463–469.

Левашов Игорь Владимирович, магистр, dolphiniq@ya.ru, Национальный исследовательский университет «МЭИ» 111250, Россия, Москва, Красноказарменная 14

Серов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, serov.an.iit@yandex.ru, Национальный исследовательский университет «МЭИ» 111250, Россия, Москва, Красноказарменная 14

Костина Анна Андреевна, магистр, anua300396@yandex.ru, Национальный исследовательский университет «МЭИ» 111250, Россия, Москва, Красноказарменная 14

THE PECULIARITIES OF THE SIGNAL FREQUENCY MEASUREMENT METHOD, BASED ON THE SIGNAL CROSSINGS THROUGH ZERO

Levashov I.V., Serov A.N., Kostina A.A.

The peculiarities of the implementation of the signal frequency measurement method are investigated. The method is based on the signal crossings through zero. The software packages Matlab Simulink and Matlab are used for this cases. The main purpose of these simulations are frequency measurement error estimation. The linearization near zero crossing method is used for reduce of measurement error. The moving average filter is used to eliminate the dependence of the used method on the input voltage noise.

Key words: Frequency measurement error, linearization, moving average filter, crossings through zero.

Levashov Igor Vladimirovich, magister, dolphinig@ya.ru, Moscow Power Engineering Institute 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14.

Serov Andrey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, serov.an.iit@yandex.ru, Moscow Power Engineering Institute 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14.

Kostina Anna Andreevna, magister, anya300396@yandex.ru, Moscow Power Engineering Institute 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14.

УДК 617-7

КОМБИНИРОВАННЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ ГЛУХИХ КОЛЬЦЕВЫХ ОТВЕРСТИЙ В КОСТНОЙ ТКАНИ И ОТРЕЗКИ ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ ЦЕЛОСТНОГО КЕРНА

Пашков Е.В.¹

Аннотация. Комбинированный инструмент, представляющий собой кольцевое сверло с установленной в его корпусе возле режущей части отрезной пилой, имеющей возможность поворота и выдвижения в радиальном направлении, относится к медицинской технике и предназначен для применения в ортопедии и травматологии при хирургическом лечении асептического некроза головки бедренной кости на ранней стадии заболевания. Инструмент включает в себя рабочую часть, выполняющую непосредственно формообразование глухого отверстия и отрезку костного керна, и хвостовик, для закрепления сверла и передачи крутящего момента. Рабочая часть представляет собой трубчатую сборную прорезную конструкцию в виде двух расположенных осесимметрично один в другом двухлепестковых трубчатых корпусов, соединенных между собой с помощью фланцев. Концы лепестков наружного корпуса снабжены внутренними кольцевыми козырьками к которым примыкают торцовые поверхности внутреннего корпуса с карманами для отрезных пилок сегментной формы. Изложена методика формообразования глухого отверстия в головке бедренной кости и отрезки образовавшегося целостного по всей глубине сверления костного керна без повреждения ее наружного хрящевого слоя. Приведена конструкция комбинированного инструмента и описан принцип его работы.

Ключевые слова. Трубчатое сверло, отрезная пила, кольцевое глухое отверстие, костный керн, головка бедренной кости

Введение. В ортопедии и травматологии при хирургическом лечении асептического некроза головки бедренной кости на ранней стадии заболевания, т.е. до момента пролома хрящевого слоя, перспективным является применение метода фенестрирующей остеотомии, основанного на костной аутопластике очага некроза здоровой костной тканью в виде целостного цилиндрического керна, полученного (вырезанного) из этого же проксимального отдела шейки и головки бедренной кости и повернутого на 180 градусов.

Для реализация данного метода требуется специальный хирургический инструмент, в частности, кольцевые (трубчатые) сверла диаметром 12...14 мм для сверления глухих кольцевых отверстий с последующим отделением от костной ткани головки целостного центрального костного керна, образовавшегося в результате сверления.

Известна конструкция реверсивного кольцевого сверла, содержащая корпус зигзаобразного кольцевого профиля с наружными и внутренними

тружкоотводящими канавками и режущими зубьями на пересечении канавок с противоположно направленными лезвиями [1].

Известно кольцевое сверло, имеющее полый корпус со стружкоотводящими канавками и режущими зубьями с лезвиями, выполненными с обеих сторон каждого зуба, которые имеют разные по величине передние углы в плане и расположены с чередованием относительно друг друга на одинаковой или разной высоте по оси сверла [2].

Известны медицинские инструменты – трепаны, представляющие собой одно- или многолезвийное кольцевое сверло, состоящее из трубчатого корпуса с режущими зубьями на торце, предназначенные для вырезания фрагментов костных тканей при вращательно-поступательном рабочем движении [3,4,5].

Известно кольцевое сверло [4], содержащее трубчатый корпус в виде лепестков с режущими зубьями на торцевых частях, разделенных продольными прорезами переменной ширины, и полый хвостовик.

Основной недостаток, присущий приведенным конструкциям инструмента, заключается в том, что при сверлении глухих отверстий в головке бедренной кости, расположенной в вертлужной впадине тазовой кости, невозможно обеспечить отделение в целом виде полученного цилиндрического керн от костной ткани и хрящевого слоя без дополнительного инструмента и без повреждения последнего.

Постановка задачи заключается в разработке и создании специального хирургического инструмента для ортопедии и травматологии с расширенными технологическими возможностями, обеспечивающего при минимальных временных затратах отделение в целом виде от костной ткани головки бедренной кости полученного цилиндрического костного керн максимально возможной длины без повреждения хрящевого слоя и применения дополнительного хирургического инструмента.

Результаты.

Комбинированный инструмент (**Рис.1**) включает в себя рабочую часть, выполняющую непосредственно формообразование глухого отверстия и отрезку костного керн, и хвостовик, для закрепления инструмента и передачи крутящего момента [7, 8]. Рабочая часть сверла (**Рис.1а**) представляет собой трубчатую сборную прорезную конструкцию с наружным диаметром d_1 и внутренним d_2 , состоящую из расположенных осесимметрично один в другом двухлепестковых трубчатых корпусов - внутреннего 9 и наружного 8, соединенных между собой с помощью фланцев 4 и 6, соответственно. Снабженный фланцем конец внутреннего корпуса содержит цилиндрическую юбку 3, предназначенную для соединения с хвостовиком 1 инструмента.

На внутренних поверхностях торцевых частей лепестков 10 (**Рис.1а,в**) наружного трубчатого корпуса, выполнены кольцевые козырьки 12, а их торцевые поверхности снабжены радиально расположенными режущими зубьями 13 с передними $\gamma_1 = 0$ и задними α_1 углами.

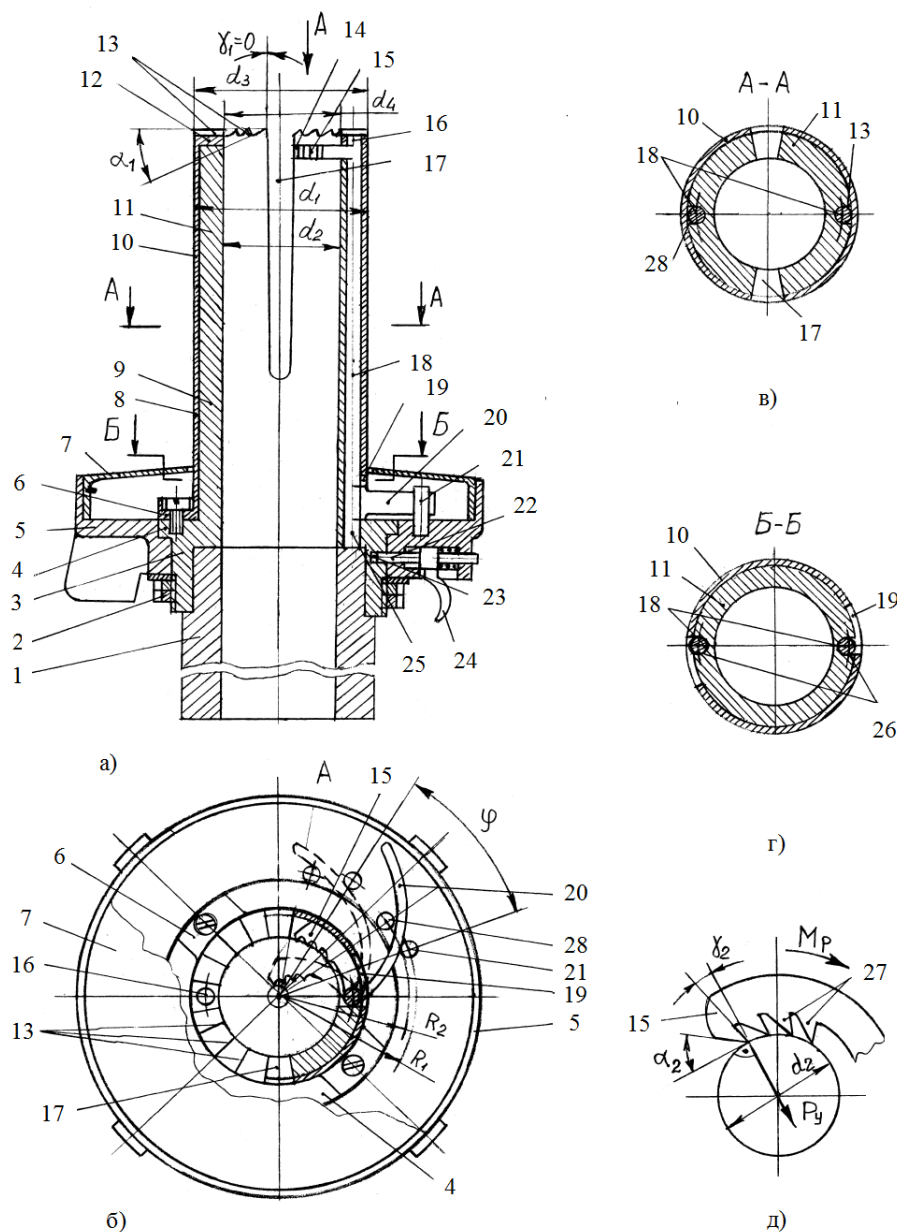


Рис.1 – Конструкция комбинированного инструмента

На прилегающих к козырькам торцовых поверхностях лепестков 11 внутреннего корпуса выполнены карманы 14 под отрезные пилки 15 сегментной формы, а на их наружных поверхностях – продольные пазы 26 для размещения стержневых державок 18 круглого сечения этих пилок (**Рис.1г**), на внутренних, обращенных к центру инструмента цилиндрических поверхностях которых, выполнены режущие зубья 27 с передними γ_2 и задними α_2 углами, вершины которых расположены на диаметре d_2 (**Рис.1д**). Для увеличения ширины прореза с целью получения зазоров между корпусами пилок и стенками прореза, способствующих уменьшению трения и отводу костной стружки, зубья пилок разведены относительно друг друга в направлениях, перпендикулярных их плоским поверхностям.

Отрезные пилки консольно прикреплены к концам 16 державок (**Рис.1а**), установленных с возможностью вращения в отверстиях козырьков, а возле других концов 25 державок, установленных в отверстиях фланца внутреннего корпуса перпендикулярно их осям, прикреплены рычаги 20 в виде спиралевидных плоских пружин, вывод концов которых наружу режущей части инструмента обеспечивается вырезами 19 в стенке наружного трубчатого корпуса. Концы консольно закрепленных на державках пилок и рычагов повернуты (направлены) в сторону, противоположную направлению вращения инструмента в процессе обработки, т.е. против движения часовой стрелки.

Выпуклая и вогнутая поверхности рычагов находятся в контакте с цилиндрическими пальцами (деформаторами) 21 и 28, соответственно, расположенными на обращенной к рычагам торцевой поверхности круглой приводной рукоятки 5 на расстояниях R_1 и R_2 от оси инструмента (**Рис.1б**). Зона расположения рычагов и пальцев (деформаторов) закрыта крышкой 7. Рукоятка установлена на юбке с возможностью углового перемещения (вращения) на угол φ , закреплена с помощью гаек 2 и снабжена механизмом фиксации углового положения внутреннего корпуса в виде подпружиненного штифта 22, входящего в зацепление с радиальными отверстиями 23, выполненными в юбке (**Рис.1а**). Для вывода штифта из зацепления предназначен фигурный рычаг (курок) 24.

Образовавшаяся в процессе сверления отверстия костная стружка отводится из зоны резания с помощью разделяющих лепестки обоих трубчатых корпусов конусообразных, сходящихся к хвостовику прорезов 17, и радиальных зазоров, образованных за счет разницы между диаметрами рабочей части инструмента: $d_1 < d_3$, $d_2 < d_4$, где d_3 и d_4 – наружный и внутренний диаметр рабочей части инструмента в зоне кольцевого козырька.

Практическое использование предлагаемой конструкции комбинированного инструмента для хирургического лечения некроза головки бедренной кости (**Рис.2а**) по методу, основанному на костной аутопластике, характеризуется тремя стадиями: первая - сверление глухого отверстия максимально возможной глубины, контролируемой с помощью электронно-оптического преобразователя; вторая - отрезка полученного костного керна; третья – извлечение целостного костного керна вместе с инструментом из глухого отверстия.

Для реализации первой стадии приводная рукоятка 5 вращается по часовой стрелке до достижения крайнего положения (**Рис.1б**), в котором фиксируется подпружиненным штифтом 22, входящим в отверстие 23 юбки 3. Под действием усилий F_1 , создаваемых цилиндрическими пальцами (деформаторами) 28 в местах контакта с вогнутыми поверхностями спиралевидных рычагов 20, осуществляется вращение державок 18 с отрезными пилками 15 вокруг своих осей по часовой стрелке, в результате которого пилки прижимаются своими наружными гладкими цилиндрическими поверхностями к лепесткам 10 наружного трубчатого корпуса 8 и утапливаются в карманы 14 внутреннего трубчатого корпуса 9, а вершины их режущих зубьев

27 располагаются на окружности диаметром d_2 . Инструмент размещается со стороны проксимальной части бедренной кости, вращается по часовой стрелке с приводным моментом M и перемещается с осевой подачей S (**Рис.2б**).

Вторая стадия реализуется без извлечения инструмента из полученного глухого отверстия. Подпружиненный штифт 22 выводится из отверстия 23 с помощью рычага (курка) 24, а круглая приводная рукоятка 5, поворотом против часовой стрелки на угол φ , переводится в другое крайнее фиксированное положение (**Рис.1б**). В начале вращения рукоятки цилиндрические пальцы 21, входя в контакт с выпуклыми поверхностями рычагов 20 с усилием F_2 , вызывают вращение державок 18 против часовой стрелки с крутящим моментом $M_{вр}$ (**Рис.2в**) и выдвижение отрезных пилок 15 из карманов 14 по направлению к оси инструмента до контакта их зубьев 27 с образованным в результате сверления центральным костным керном. Дальнейшее вращение приводной рукоятки вызывает только изгиб пальцами 21 рычагов 20 по направлению к рабочей части инструмента, в результате чего они занимают положение, показанное на **Рис.1б** пунктирными линиями, и в них происходит накопление (аккумулирование) энергии упругих деформаций. Затем к хвостовику инструмента прикладывается крутящий приводной момент M , вызывающий круговое (орбитальное) движение отрезных пилок 15 относительно неподвижного керна, врезание в него их зубьев под действием радиальных составляющих сил резания P_y , создаваемых накопленной в рычагах энергией упругой деформации, отрезку (отделение) керна от костной ткани головки бедренной кости. После этого отключается приводной момент M .

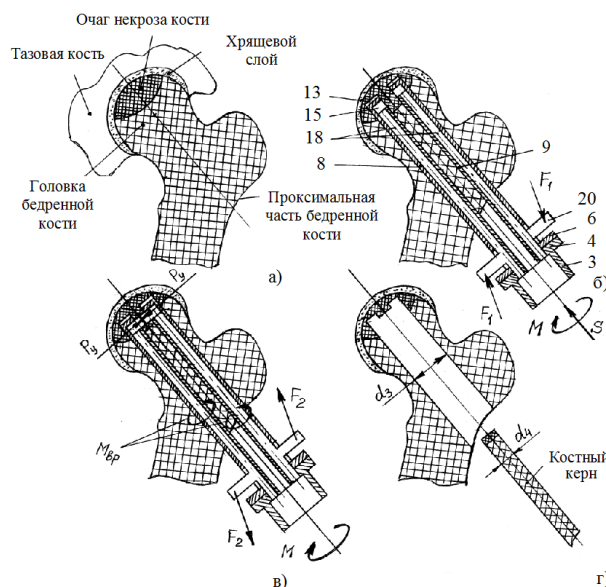


Рис.2 - Стадии сверления глухого отверстия, отрезки и извлечения костного керна

На третьей стадии инструмент вместе с костным керном диаметром d_4 извлекается из полученного глухого отверстия диаметром d_3 (**Рис.2г**), приводная рукоятка возвращается по часовой стрелке в исходное (до сверления) положение, отрезные пилки задвигаются в карманы внутреннего

корпуса и керн, благодаря прорезам 17 в лепестках, извлекается (выталкивается) наружу через отверстие в инструменте диаметром d_4 .

Заключение.

Конструкция инструмента обеспечивает получение в костной ткани шейки и головки бедренной кости глухого кольцевого отверстия и целостного по всей глубине сверления, отделенного (отрезанного) костного керна, используемого затем в соответствии с методикой лечения некроза головки бедренной кости, а также способствует уменьшению времени оперативного вмешательства и не требует применения дополнительного хирургического инструментария.

Библиографический список

1. Реверсивное кольцевое сверло: патент РФ №2377101, МПК В23В51/04 / Ю.М. Ермаков, О.Н. Щербаков; опубл. 27.12.2009.
2. Кольцевое сверло: патент РФ №2287407, МПК В23В51/04 / Ю.М. Ермаков, С.М. Маркие, О.Н. Щербаков; опубл. 20.11.2006.
3. ГОСТ 25725-89 «Инструменты медицинские»; www.innomed.net, Orthopedic Instruments, p.46).
4. Кольцевое сверло: патент РФ №2460613, МПК В23В51/04 / Ю.М. Ермаков, О.Н. Щербаков; опубл. 10.09.2012.
5. Остеосинтез: Каталог. ООО «ОСТЕОСИНТЕЗ» / www.Osteosyn.yaroslavl.ru.
6. Стабильно-функциональный остеосинтез: Каталог. НПО «ИНМЕД» / www.inmed.kiev.ua.
7. Комбинированное кольцевое костное сверло: патент РФ №2662548, МПК А61В 17/16 / Е.В. Пашков, М.И. Калинин, В.И. Пахалюк; опубл. 26.07.2018, Бюл. №21.
8. Комбинированное кольцевое сверло для глухих отверстий в костной ткани: патент РФ №2675339, МПК А61В 17/16 / Е.В. Пашков, М.И. Калинин, Г.Д. Олиниченко; опубл. 18.12.2018, Бюл. №35.

Bibliograficheskiy spisok

1. Reversivnoe kolcevoe sverlo: patent RF 2377101, MPK В23В51/04 / Y.M. Ermakov, O. N. Shcherbakov; opubl. 27. 12 .2009.
2. Kolcevoe sverlo: patent RF 2287407, MPK В23В51/04 / Y. M. Ermakov, S.M. Markie, O.N. Shcherbakov; opubl. 20. 11. 2006.
3. GOST-25725-89 «Instrumenty medicinskie; www.innomed.net, Orthopedic instruments, p. 46.
4. Kolcevoe sverlo: patent RF 2460613, MPK В23В51/04 / Y. M. Ermakov, O.N. Shcherbakov; opubl. 10 .09. 2012.
5. Osteosintez: Katalog. ООО «Osteosintez» /www.osteosyn, Yaroslavl.ru.
6. Stabilno funkcionalnyj osteosintez: Katalog. NPO «Inmed» /www.inmed.kiev.ua.

7. Kombinirovannoe kolcevoe kostnoe sverlo: patent RF 2662548, MPK A61B 17/16 / E.V. Pashkov, M.I. Kalinin, V.I. Pahalyuk; opubl. 26. 07. 2018, byul. 21.

8. Kombinirovannoe kolcevoe sverlo dlya gluhih otverstij v kostnoj tkani: patent RF 2675339, MPK A61B 17/16 / E.V. Pashkov, M.I. Kalinin, G.D. Olinichenko; opubl. 18. 12. 2018, byul. 35.

Пашков Евгений Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», pashkov@sevsu.ru , Россия, Севастопольский государственный университет

COMBINED TOOL FOR DRILLING THE DEAF RING HOLES IN BONE TISSUE AND CUTTING OF THE FORMED INTEGRAL CORE

Pashkov E. V.

The combined tool, which is a ring drill with a cutting file installed in its body near the cutting part, which can be rotated and extended in the radial direction, belongs to medical equipment and is intended for use in orthopedics and traumatology in the surgical treatment of aseptic necrosis femoral heads at an early stage of the disease. The tool includes a working part, which directly performs the forming of a blind hole and a segment of bone core, and tailing, for fastening the drill and transmitting torque. The working part is a tubular prefab slotted structure in the form of two axially symmetrically one in the other two-lobe tubular shells interconnected by means of flanges. The ends of the petals of the outer casing are provided with internal annular ridges to which are adjacent the end surfaces of the inner core with pockets for cutting files of segmental shape. The method of forming a blind hole in the head of the femur and segments of the hollow core bone that has been formed throughout the entire depth of the bone without damaging its outer cartilage layer is described. The design of the combined instrument and the principle of its operation are described.

Keywords: Tubular drill, sawing file, annular blind hole, bone core, femoral head

Pashkov Evgenii Valentinovich, doctor of technical sciences, professor, Department of Instrument systems and automation of technological processes, Russia, pashkov@sevsu.ru , Sevastopol, Sevastopol State University.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №2(6) 2019 г.

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

05.02.00 Машиностроение и машиноведение

Адрес редакции:

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

Телефон редакции: 8(692)550077

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

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве БГТУ.

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

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

Учредитель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, Российская Федерация, Севастополь, ул. Университетская 33. № рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт.2018 г.

Издатель:

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

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

Брянск 2019 г.