

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№3(7)
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)

Кристал 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

- Вартанов М.В., Зинина И.Н., Зотин Д.О.** Экспериментальные исследования роботизированной отделочной обработки авиационных агрегатов 3
- Карлов А.Г.** Структура систематических непрерывных инноваций в период перехода от традиционного производства к передовым производственным технологиям 11
- Лазарев В.Б., Поляков А.М., Сопин П.К., Картавенко А.А.** Обеспечение синхронных движений исполнительных органов электроприводов ЕРСО фирмы FESTO в стенде для испытаний трансформаторных протезов 17
- Липка В.М., Братан С.М., Рапацкий Ю.Л.** Анализ и выбор рационального варианта резьбошлифования при изготовлении резьбонакатных роликов 25
- Шушляпин Е.А., Безуглая А.Е.** Управление антропоморфным роботом методом конечного состояния 38

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Попов Н.М., Серов А.Н.** Сравнительный анализ методов снижения эффекта «растекания спектра» 48
- Доронина Е.Б.** Повышение эффективности обслуживания сложной технической аппаратуры на основе модельно-ориентированного проектирования 54
- Осадченко А.Е.** Автоматизированная система имитации качки судна на основе многокоординатной платформы 61
- Чупрынин Е.А., Доронина Ю.В.** Функциональное моделирование как способ описания процесса информационного поиска 67
- Копп В.Я., Заморёнов М.В., Чаленков Н.И., Скатков И.А.** Моделирование функционирования производственного элемента с обесценивающими отказами при использовании численного метода фазового укрупнения 73
- Обжерин Ю.Е., Бойко Е.Г., Федоренко С.Н.** Стационарные характеристики надежности и эффективности технической системы с упреждающим восстановлением по остаточной наработке 88

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Пашков Е.В., Поливцев В.П.** Мультицифровые гидровытеснители гидроприводов промышленного технологического оборудования 98

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.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© Авторы статей

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ
ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ АВИАЦИОННЫХ АГРЕГАТОВ**

Варганов М.В.¹, Зинина И.Н.², Зотин Д.О.³

***Аннотация.** В статье рассматриваются перспективы роботизации отделочных слесарных операций. Приведен обзор возможных технических решений при роботизации ручных доводочных операций. Рассматривается экспериментальная установка для роботизированной отделочной обработки, оснащенная силомоментным датчиком, шпинделем, оснасткой и инструментом. Приведены результаты экспериментальных исследований. Сформулированы задачи дальнейшей работы.*

***Ключевые слова.** Роботизированная обработка, отделочные операции, авиационные агрегаты, качество поверхности.*

Одним из новых областей применения промышленных роботов является отделочная механическая обработка. Роботизированная механическая обработка является одним из направлений снижения трудоемкости производства. Роботы имеют широкие возможности переналадки и позволяют обрабатывать сложные детали. Тем не менее, у них есть два основных ограничения – недостаточная точность и низкая жесткость.

Авторами статьи проведен обзор возможных технических и технологических решений при роботизированной отделочной обработке деталей машин [1].

В работе [2] внимание адресовано трем главным проблемам, препятствующим роботизированным процессам механической обработки: 1) генерирование программы робота для сложных 3D кривых без опытного технического специалиста и модели CAD; 2) улучшение качества механической обработки с нежестким и низкоточным роботом; 3) повышение эффективности роботизированной механической обработки, обеспечивая оперативную оптимизацию с максимальным съемом материала.

Вопросы применения силового управления при автоматическом изучении траектории на нелинейных поверхностях рассматриваются в работе [3]. Процесс полировки очень сложен и нынешняя версия пакета силового управления АВВ не может дать достаточно устойчивых результатов, которые будут рекомендоваться для реализации. Главная проблема - отсутствие соответствия требуемой ориентации инструмента относительно отливки и позиционные отклонения из-за различных размеров заготовки. Процесс снятия заусенцев становится проще с мобильным роботом и методологией, предложенной в работе.

Сложность преобразования САД-модели изделия в траектории движения робота рассматривается в работе [4]. Показаны пути преодоления данного препятствия, сообщается о том, что производители роботов начали производить роботы повышенной жесткости для механической обработки.

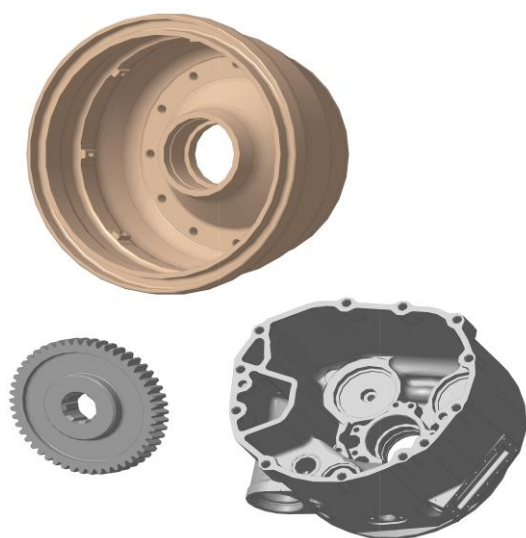
Технической основой большинства предлагаемых решений является оснащение роботов силомоментными датчиками, оценивающими фактические значения составляющих силы резания. Разрабатываемые алгоритмы управления роботами направлены на компенсацию возникающих отклонений от программных траекторий движения инструмента.

В российском машиностроении имеет место большой объем слесарных операций после обработки деталей на станках с ЧПУ. Подобная ситуация и в авиационной корпорации «РУБИН» (г. Балашиха, Московская обл.). При производстве гидроагрегатов весь объем операций по снятию заусенцев, полировке и доводке выполняется вручную.

На **Рис.1**, приведены примеры деталей и технических требований к операциям отделочной обработки. Корпорация «РУБИН» заинтересована в снижении трудоемкости слесарных операций изготовления авиационных гидроагрегатов на основе роботизации отделочной механообработки.

Исследования проводились в лаборатории «Средства автоматизации и промышленные роботы» Московского политехнического университета. Целью проводимых исследований являлось снижение трудоемкости и повышение производительности слесарных и отделочных операций при производстве деталей авиационных гидроагрегатов на основе создания технологии роботизированной обработки.

Для достижения поставленной цели была смонтирована экспериментальная установка (**Рис.2**), которая включает в себя: промышленный робот ABB IRB-140, силомоментный датчик (СМД) Schunk FTD-Gamma SI-65-5, шпиндель GDF65-24Z-0.8, тиски ГОСТ 4045-75 и режущий инструмент, изготовлены образцы из алюминиевого сплава АК-4 для проведения исследований с габаритами 40x20x20 мм.



- Снятие заусенцев и притупление острых кромок по наружному и внутреннему контуру;
- Заправка и полировка $R_{0,5}+0,5\text{мм}$ в отверстиях на дне корпуса;
- Зачистка внутренних плоскостей до шероховатости $Ra\ 0,63$.

Рис.1 – Авиационные гидроагрегаты и технические требования

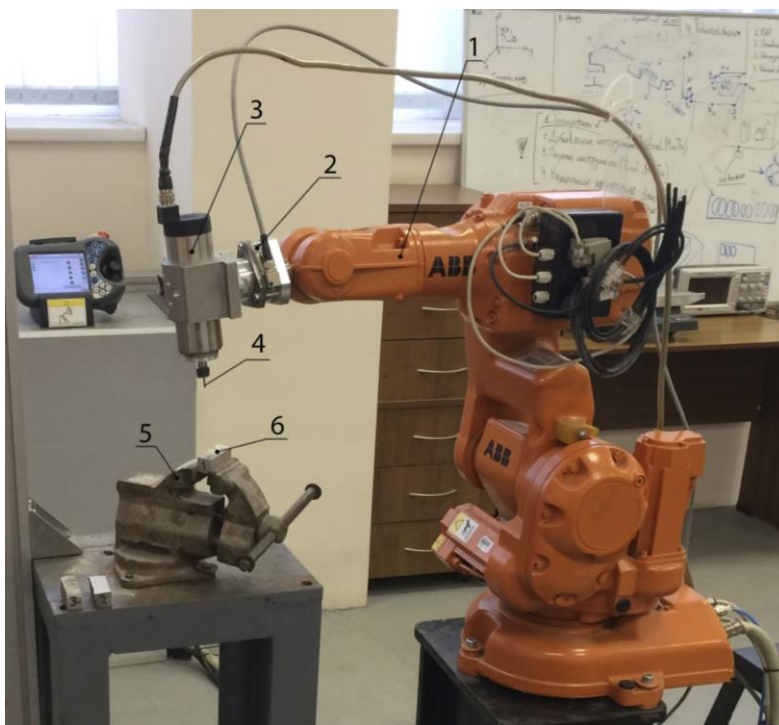


Рис.2 – Общий вид экспериментальной установки: 1 – робот ABB IRB 140; 2 – СМД SI-65-5; 3 - шпиндель GDF65-24Z-0.8; 4 – режущий инструмент; 5 - тиски ГОСТ 4045-75; 6 – экспериментальный образец

Для обработки использовался шпиндель GDF65-24Z-0.8 цилиндрической формы с воздушным охлаждением весом 25 Н. Технические характеристики: скорость вращения: до 24000 об/мин; мощность – 0.8 кВт; момент – 0.22 Нм; напряжение – 220 В; частота – 400 Гц; оснастка – цанговый патрон ER11.

Шестиосевой силомоментный датчик FTD-Gamma SI-65-5 фирмы Schunk применяется в роботизированных операциях, таких как шлифование, фрезерование и сборка. Датчик имеет высокую прочность, небольшой вес, изготовлен из высокопрочного алюминиевого сплава и защищен от влаги.

Для притупления острых кромок и снятия заусенцев высотой от 0,05 до 1,5 мм с алюминиевых заготовок подобран вариант отделочного инструмента: цельные вольфрам-ванадиевые фрезы с диаметром режущей части 3 мм фирмы Proxxon (Германия). Фрезы применяются для работ по цветным и драгоценным металлам.

Для создания программы отделочной обработки корпуса использована виртуальная среда RobotStudio [5]. Обучение осуществлялось заданием множества точек траектории обработки.

После расточных, фрезерных и токарных операций, на кромках заготовок образуются заусенцы (Рис.3). Ручное удаление заусенцев является дорогостоящим и длительным процессом. Многочасовая монотонная работа в значительной степени связана с труднодоступными местами. В заводской лаборатории были проведены замеры высоты и толщины заусенцев после механообработки. Для измерения использовался видеоизмерительный

микроскоп модели NVM-3020 фирмы NORGAU и цифровой штангенциркуль с делением 0,01 мм фирмы MITUTOYO. Результаты исследования позволили установить интервалы изменений параметра заусенца: высота от 0,05 – 1,5 мм; толщина от 0,02 – 0,5 мм.

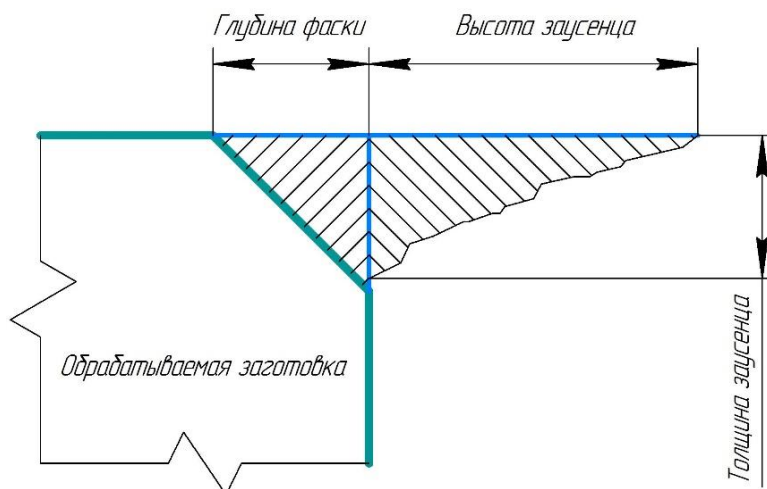


Рис.3 – Заусенец на кромке заготовки после ЧПУ операции

Анализ вибраций при контроле силы для различных вариантов базирования заготовки.

В ходе проведенных исследований выявлена различная степень вибрации и зафиксирована СМД. Испытания проводились для определения влияния погрешности базирования обрабатываемой заготовки относительно робота на генерацию вибраций и точность обработки. Следует отметить, что рабочая зона располагалась вблизи основания робота (~240 мм). Во время эксперимента были выбраны три различных положения. Первое положение заготовки находилось вблизи робота. Второе – на границы рабочей зоны. Третье положение характеризовалось поворотом заготовки на 90°. Движение инструмента осуществлялось по поверхности от точки А до Б, как показано **Рис.4**.

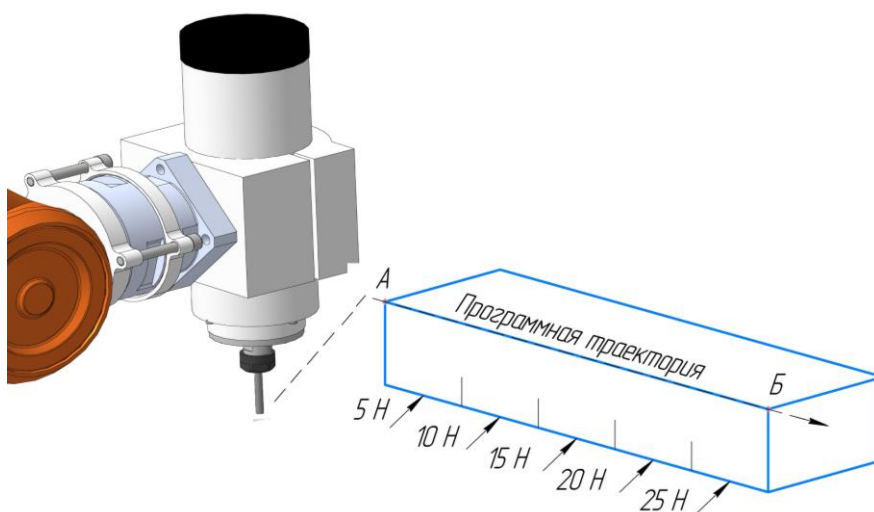


Рис.4 – Траектория обработки

Разброс сил измерялся с помощью СМД и находился в интервале 5...25 Н.

В первом эксперименте заготовка размещалась максимально близко к основанию робота. Сила в данном эксперименте была постоянной. Во втором положении сила задана максимальной (консоль также была максимальной). В последнем эксперименте заготовка поворачивалась на 90° в сравнении со вторым экспериментом. Данное положение заготовки также привело к увеличению силы, по сравнению с предыдущими экспериментами.

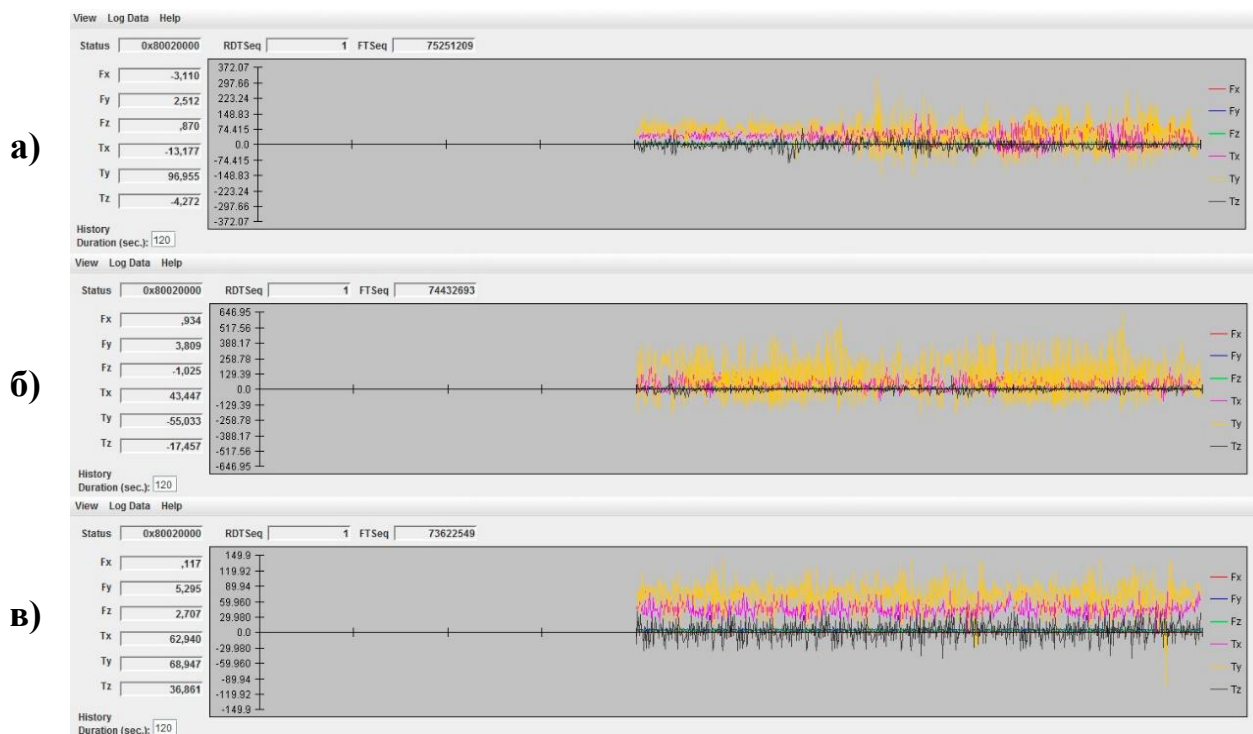


Рис.5 – Распределение силы резания при различных вариантах базировании заготовки: а) – заготовка расположена вблизи основания робота; б) – заготовка расположена на границе рабочей зоны; в) – заготовка повернута относительно второго положения на 90°

Проведенные эксперименты позволили установить взаимосвязь вылета выходного звена робота и величины возникающих вибраций, следовательно, и точности обработки.

Взаимосвязь усилий резания, подачи и точности обработки в операции удаления заусенцев.

С целью оптимизации технологии обработки в процессе снятия заусенцев варьировались следующие параметры: сила резания, подача и число оборотов. Исследование проводилось для оценки влияния режимов резания на качество обработки. С целью оптимизации силы и подачи траектория обработки была разделена на секции с различной силой и подачей. Скорость вращения шпинделя составляла 22000 об/мин. Заштрихованная область на **Рис.6** указывала материал, удалённый с поверхности заготовки. Обрабатываемая поверхность была разделена на секции. Сила резания лежала в интервале от 10Н до 20Н при изменении подач от 5 до 10 мм/с (**Рис.6**). Черная пунктирная

линия означает допуск $\pm 0,30$ мм. Высота удаленного материала составляла от 0,03 до 0,8 мм. Удаление заусенцев происходило по прямой линии.

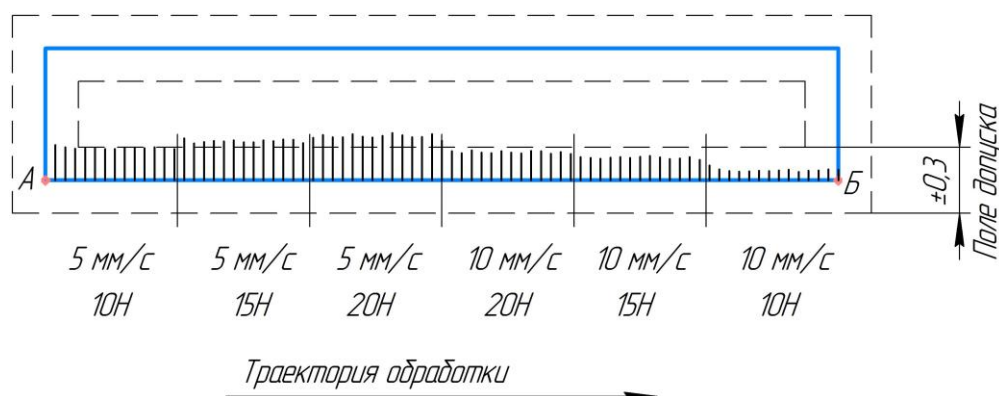


Рис.6 – Взаимосвязь усилий резания, скорости и точности обработки

Результаты экспериментов показали, что обеспечение минимального удаления материала (0,03 мм) может быть достигнуто с помощью борфрезы. Эксперименты также подтвердили важность позиционирования заготовки и точность ориентации инструмента по отношению к обрабатываемой поверхности.

На экспериментальной установке проведены тестовые исследования, направленные на выявление режимов обработки, обеспечивающих требуемое качество поверхностей. Исследования позволили установить оптимальные значения частот вращения и скорости резания, при которых обеспечивается требуемое качество поверхностей деталей. Для борфрез диаметром 3 мм скорость резания составила 220 м/мин с изменением частоты вращения инструмента от 21000 до 24000 об/мин и оптимальным числом оборотов в 24 000 об/мин.

Оценка качества обработки проводилась с использованием профилометра MarSurf M400 фирмы Mahr. Проведенная оценка шероховатости поверхности, обработанной борфрезой и лепестковым кругом, показала, что заусенцы успешно удалены и сформирована поверхность требуемого качества.

Проведенные эксперименты носили тестовый характер и были направлены на выявление технологических режимов роботизированной обработки на операциях снятия заусенцев и шлифования поверхностей. Эксперименты подтвердили возможность роботизации данной технологической операции с обеспечением качества поверхности.

Дальнейшие исследования будут направлены на создание алгоритмов адаптивного резания и технологических рекомендаций типовых операций отделочной обработки деталей авиационных гидроагрегатов и колес самолетов.

Библиографический список

1. Вартанов, М.В. Технологические возможности роботизированной отделочной обработки в условия многономенклатурного производства / М.В. Вартанов, И.Н. Зинина, Д.О. Зотин // «Вестник РГАТУ», №1(40), 2017 – с. 190-194.

2. Zengxi Pan Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control / Zengxi Pan, Hui Zhang // «Industrial Robot», 2008, vol. 35, n. 5, pp. 400-409.

3. Marthin Krantz Robotized polishing and deburring with force feedback control / Marthin Krantz, Rikard Andersson // Master Thesis, Master Degree program in Robotics, Department of Engineering Science, S-461 86 Trollhattan, SWEDEN, 2010.

4. www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Featured-Articles/Why-Robots-Are-Taking-It-Off/ content_id/4502

5. <https://new.abb.com/products/robotics/ru/robotstudio>

Bibliograficheskiy spisok

1. Vartanov, M.V. Tekhnologicheskie vozmozhnosti robotizirovannoj otdelochnoj obrabotki v usloviya mnogonomenklaturnogo proizvodstva / M.V. Vartanov, I.N. Zinina, D.O. Zotin // «Vestnik RGATU», №1(40), 2017 – s. 190-194.

2. Zengxi Pan Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control / Zengxi Pan, Hui Zhang // «Industrial Robot», 2008, vol. 35, n. 5, pp. 400-409.

3. Marthin Krantz Robotized polishing and deburring with force feedback control / Marthin Krantz, Rikard Andersson // Master Thesis, Master Degree program in Robotics, Department of Engineering Science, S-461 86 Trollhattan, SWEDEN, 2010.

4. www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Featured-Articles/Why-Robots-Are-Taking-It-Off/ content_id/4502

5. <https://new.abb.com/products/robotics/ru/robotstudio>

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

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

Зотин Даниил Олегович, аспирант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», kalapsov@yandex.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF ROBOTIZED FINISHING OF AIRCRAFT UNITS

Vartanov M.V., Zinina I.N., Zotin D.O.

The article discusses the prospects for the robotics of finishing locksmith operations. A review of possible technical solutions for the robotization of manual lapping operations is given. An experimental setup for robotic finishing processing is considered, equipped with a torque sensor, spindle, tooling and tool. The results of experimental studies are presented. The tasks of further work are formulated.

Keywords: robotic processing, finishing operations, aircraft units, surface quality.

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

Zinina Inna Nikolaevna, Ph.D. tech. sciences, associate professor, associate professor of the chair "Technologies and equipment of mechanical engineering", i.n.zinina@mospolytech.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University.

Zotin Daniil Olegovich, PhD student, Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, kalapsov@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

СТРУКТУРА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ НЕПРЕРЫВНЫХ ИННОВАЦИЙ В ПЕРИОД ПЕРЕХОДА ОТ ТРАДИЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА К ПЕРЕДОВЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Карлов А.Г.¹

Аннотация. Показано, что в настоящее время в современной высокотехнологичной промышленности произошли значительные структурные изменения – смещение «центра тяжести» в глобальной конкуренции на этап проектирования. Анализируется такое явление как глобальная цифровая трансформация экономики в цифровую экономику, а высокотехнологичной промышленности – в цифровую промышленность. Обосновывается идея, что компьютерное проектирование и моделирование, в процессе применения передовых промышленных технологий (ППТ), будет более эффективным, если современный софт, поддерживающий процессы генерации изобретательских идей станет применяться еще на стадии создания концепта инновационного изделия или технологии.

Ключевые слова. Передовые производственные технологии, компьютерное проектирование и моделирование, концепт инновационного проекта, цифровые модели изделий и процессов, прорывные исследования, методы компьютерного проектирования новых материалов.

В настоящее время производство и продукция различных отраслей промышленности стали значительно сложнее: возросло число механических и электронных компонентов, число строк программного кода. Конкурентная среда и законы развития технических систем ставят перед новыми проектами очень жесткие требования: все компоненты инновационных продуктов минимизируются по габаритам, массе, энергопотреблению и другим характеристикам. В результате проявились некоторые негативные тенденции – увеличение продолжительности и стоимости разработок, потеря качества изделий, снижение прибыли компаний-разработчиков, а в некоторых случаях – и ущерб репутации производителей.

Целью настоящего исследования является анализ опыта компаний-лидеров мирового рынка по созданию структуры систематических непрерывных инноваций в период перехода от традиционного производства к передовым производственным технологиям и определение тех стадий жизненного цикла изделий, которые нуждаются в дальнейшем совершенствовании алгоритмов и программ, способных повысить качество инновационных продуктов и сократить время генерации изобретательских идей, которые могут стать базой для создания новых изделий и технологий.

Сравнительно недавно в приоритете были традиционные подходы и технологии, основанные, как правило, на доводке новых или немного модернизированных изделий путём дорогостоящих испытаний. Однако такая технология создания инновационных продуктов достигла своего «потолка» в

развитии. Такой способ создания новых изделий становится сегодня неконкурентоспособным.

Еще несколько лет назад процесс создания инновационного продукта состоял из следующих этапов. Сначала на основе реального объекта (прототипа) строилась его физическая модель, причем, как правило, значительно упрощенная. Параллельно проходил и процесс формирования математической модели, которая описывалась уравнениями математической физики (т. е. строилась математическая модель проектируемой конструкции). После этого, в соответствии с теоретическими положениями проводили исследование построенной модели. Затем, по итогам многочисленных и дорогостоящих натурных испытаний опытных образцов (прототипов) получали дополнительную информацию о поведении («отклике») опытного образца. И, наконец, итерационным путем производилась корректировка математической расчетной модели, рабочей конструкторской документации, а по итогам – и доводка конечного изделия до требуемых целевых характеристик [1, 2].

В настоящее время в современной высокотехнологичной промышленности произошли значительные структурные изменения – смещение «центра тяжести» в глобальной конкуренции на этап проектирования.

Возможности дальнейшего роста производительности в нынешних условиях экономического и технологического уклада очень близки к насыщению, к своему максимуму, как в традиционном производстве, так и в непроизводственных секторах. Для сохранения конкурентоспособности и достижения высоких темпов производительности в настоящее время необходимо, прежде всего, реализовать научно-технологическую и инновационную политику, которая проводится индустриально развитыми странами и рядом новых индустриальных держав. Цель таких комплексных мер – стимулирование разработки и внедрения передовых технологий, производительность которых существенно превышает характеристики традиционных [2, 3].

Пока, к сожалению, ситуация с результативностью инновационного проектирования нашими специалистами далека от реальной потребности экономики нашей страны в условиях перехода к уже происходящей во многих странах четвертой промышленной революции.

Чтобы эффективно решать эти проблемы, в мире набирает обороты такое явление как глобальная цифровая трансформация экономики в цифровую экономику, а высокотехнологичной промышленности – в цифровую промышленность. При этом формируются различные цифровые платформы, цифровые двойники (Digital Twin) как реальных объектов, так и продуктов (DT-1), а также производственных процессов (DT-2). Создаются экспертные системы интеллектуальных помощников как первый этап развития процессов применения искусственного интеллекта (ИИ).

Интенсивно развивается автоматизация, роботизация и интеллектуализация промышленности, реализуется переход к киберфизическим

системам, происходит объединение материального и цифрового (виртуального) миров.

Ярким примером реализации системной подготовки отечественных кадров, способных быстро адаптироваться в потоках сложившихся проблем, стал Инжиниринговый центр СПбПУ, ГК CompMechLab®. Центр НТИ СПбПУ осуществляет опережающую практико-ориентированную целевую подготовку специалистов в рамках решения проблем-вызовов предприятий высокотехнологичной промышленности. Такой подход реализует специально созданный Институт передовых производственных технологий (ИППТ) СПбПУ [3].

Не менее значимые результаты цифровизации промышленности имеет международный концерн Camozzi Group. Эта группа являет собой один из убедительных примеров эффективности системного подхода к планированию и реализации инновационных решений в крупной многоотраслевой промышленной компании (**Рис.1**). "Инновационная система Camozzi" - это способ Группы Camozzi "создавать продукцию", который органично переплетается с "Общим контролем качества" (TQM), "Системой экономического производства" (LMS) и "Управлением поставками" (SCM) [4].



Рис.1 – Структура систематических непрерывных инноваций Camozzi Group [4]

Научно-исследовательский центр Camozzi оказывает поддержку компаниям Группы в данном процессе, начиная с раннего этапа анализа передовых решений и до технического управления патентными заявками и уже выданными патентами.

В холдинге Camozzi Group, создано новое подразделение Camozzi Digital для поддержки компаний, которые хотят расти и быть успешными, используя цифровые инновации и Интернет Вещей (IoT). Благодаря технологиям, предлагаемым Camozzi Digital, Фабрики Будущего будут в состоянии в полной мере использовать преимущества цифрового управления производством, ориентируясь исключительно на продукт, не связывая его производство с решением оперативных вопросов управления оборудованием.

Цифровая Фабрика (**Рис.2**), которая обслуживает Фабрики Будущего это Концепция Цифровых Фабрик Будущего (Smart Factory).

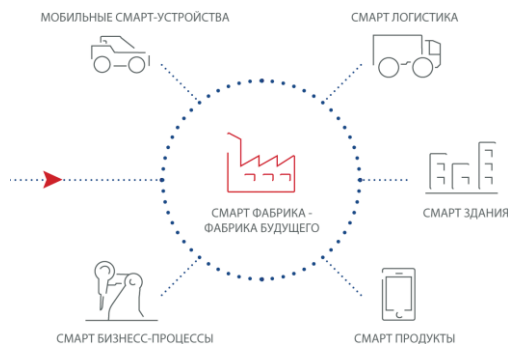


Рис.2 – Концепция Цифровых Фабрик Будущего (Smart Factory) [6].

Camozzi Digital предлагает расширенный аналитический инструмент, с помощью которого контролируется производительность процессов, осуществляется интеллектуальная аналитика, а условия функционирования механизмов постоянно коррелируют с потреблением энергии и физическим состоянием компонентов системы (**Рис.2**).

Комбинации компетенций и технологий во всех своих дивизионах Camozzi Group – автоматизация и мехатроника, станочное и текстильное машиностроение, производственный сектор – позволяют синхронизировать опыт, инновации и ноу-хау универсальным способом в каждой из своих компаний. Это означает объединение производственных, управленческих и технических знаний и имеет свое название – Цифровая Фабрика Будущего (**Рис.3**).

Приведенные выше примеры эффективной реализации передовых промышленных технологий взамен традиционных, концепции Фабрик Будущего, которые внедрены и внедряются, в частности, на предприятиях ООО «Камоцци Пневматика» в Москве и Симферополя показывают успешность практически на всех этапах жизненного цикла изделий. Однако есть пока и слабые звенья в этой технологической цепочке.



Рис.3 – Фрагменты Цифровых Фабрик Будущего [4].

Так, если проанализировать степень успешности процесса цифровизации этапа создания концепта инновационного продукта, который всегда предшествует первому этапу этого процесса – компьютерному проектированию и моделированию объекта, то можно отметить недостаточно развитый рынок компьютерных продуктов поддержки процессов поиска концепта - ключевой изобретательской идеи.

Из достаточно известных примеров успешности применения софта для синтеза инновационных продуктов можно отметить работы в области создания инновационных материалов. Это, прежде всего, работы профессора Оганова А.Р., автора методов компьютерного проектирования новых материалов и предсказания кристаллических структур USPEX [5,6]. USPEX (Universal Structure Predictor: Evolutionary Xtallography - метод, разработанный лабораторией Оганова с 2004 года. предсказания кристаллической структуры очень древние и, по сути, составляют центральную проблему теоретической кристаллохимии. В настоящее время его используют более 5000 исследователей по всему миру.

Что касается перспективного софта, обеспечивающего эффективную поддержку процессов поиска изобретательских идей, способных в дальнейшем стать инновационным продуктом, то следует проанализировать эволюцию подобных программных продуктов и степень успешности их применения в различных условиях. Об этом будет информация в последующих статьях.

Выводы:

- в настоящее время в современной высокотехнологичной промышленности произошли значительные структурные изменения – смещение «центра тяжести» в глобальной конкуренции на этап проектирования;
- актуальной стала задача обеспечения опережающей практико-ориентированной целевой подготовки специалистов в рамках решения проблем-вызовов предприятий высокотехнологичной промышленности;
- следует отметить недостаточно развитый рынок компьютерных продуктов поддержки процессов поиска ключевой изобретательской идеи, на которой должен строиться концепт инновационного продукта и технологии.

Библиографический список

1. Новая технологическая революция: вызовы и возможности для России. Экспертно-аналитический доклад Центра стратегических разработок. Под научным руководством В.Н. Княгинина. МОСКВА, 2017. - 136 с. URL: <https://csr-nw.ru/2017/10/novaya-tehnologicheskaya-revolutsiya-2017-10-13.pdf>
2. Боровков, А.И. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, В.М. Марусева // Научно-технический сборник «Оборонная техника», №1, 2018, с. 6-33.
3. Рудской, А.И. Инженерное образование: мировой опыт подготовки интеллектуальной элиты / А.И. Рудской, А.И. Боровков, П.И. Романов, К.Н. Киселева. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 216 с.
4. Сайт о международном концерне Camozzi Group / URL: <https://www.camozzigroup.com>
5. Оганов Артем Ромаевич. Метод USPEX. URL: <https://ruspekh.ru/people/item/oganov-artjom-romaevich>.
6. Сайт программы USPEX. URL: <https://uspex-team.org/en>

Bibliograficheskiy spisok.

1. Novaya tekhnologicheskaya revolyuciya: vyzovy i vozmozhnosti dlya Rossii. Ekspertno-analiticheskiy doklad Centra strategicheskikh razrabotok. Pod nauchnym rukovodstvom V.N. Knyaginina. MOSKVA, 2017. - 136 s. URL: <https://csr-nw.ru/2017/10/novaya-tehnologicheskaya-revolutsiya-2017-10-13.pdf>
2. Borovkov, A.I. Cifrovye dvojniki i cifrovaya transformaciya predpriyatij OPK / A.I. Borovkov, YU.A. Ryabov, K.V. Kukushkin, V.M. Maruseva // Nauchno-tekhnicheskij sbornik «Oboronnaya tekhnika», №1, 2018, s. 6-33.
3. Rudskoj, A.I. Inzhenernoe obrazovanie: mirovoj opyt podgotovki intellektual'noj elity / A.I. Rudskoj, A.I. Borovkov, P.I. Romanov, K.N. Kiseleva. – SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2017. – 216 s.
4. Site about the international concern Camozzi Group / URL: <https://www.camozzigroup.com>
5. Oganov Artjom Romaevich. Method USPEX. URL: <https://ruspekhn.ru/people/item/ogonov-artjom-romaevich>.
6. Site of program USPEX. URL: <https://uspex-team.org/en>

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

STRUCTURE OF REGULAR CONTINUOUS INNOVATIONS IN TRANSITION FROM TRADITIONAL MANUFACTURE TO THE ADVANCED INDUSTRIAL TECHNOLOGIES.

Karlov A.G.

It is shown, that now in the modern hi-tech industry there were considerable structural changes - displacement of "centre of gravity" in a global competition on a design stage. The idea is proved, that computer designing and modelling, in the course of application of the advanced industrial technologies (AIT), will be even more effective if the modern software supporting processes of generation inventive ideas begins to be applied at a creation stage concept of innovative product or technology. The urgency of wider application of the perspective software products supporting processes of generation of inventive ideas at a stage of concept creation of the innovative project is shown.

Key words: new industrial revolution, the advanced industrial technologies, the automated designing and modelling, technology of innovative designing, the hi-tech industry, the digital industry, methods of computer designing of new materials.

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

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИНХРОННЫХ ДВИЖЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЕРСО ФИРМЫ FESTO В СТЕНДЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТРАНСФЕМОРАЛЬНЫХ ПРОТЕЗОВ

Лазарев В.Б.¹, Поляков А.М.², Сопин П.К.³, Картавенко А.А.⁴

***Аннотация.** Статья содержит описание способов для синхронизации работы приводов устройства с параллельной механической структурой. Предложен метод получения управляющих данных с использованием математической модели устройства. Описан макет для демонстрации предложенного метода.*

***Ключевые слова.** Трансфеморальный протез, испытания, платформа Гью-Стюарта, протокол CVE, сокет TSP/IP.*

В последние годы парадигма синтеза механизмов, как носителей механических движений в современных машинах, претерпела существенные изменения по отношению к классической [1]. Одна из главных причин, способствовавших этому, связана с обширным внедрением в машиностроительную практику управляемых мехатронных устройств, использование которых в машинах, предназначенных для реализации сложных движений рабочих органов, позволило существенным образом повысить точность желаемых движений при одновременном упрощении конструкций машин [2].

Так, например, работоспособность многих изделий медицинского назначения должна быть подтверждена комплексом статических и динамических испытаний. При этом условия испытаний, включая законы изменения кинематических и динамических параметров, строго регламентируются стандартами. Их реализация на традиционных испытательных машинах представляет собой весьма сложную задачу с различных точек зрения. Такие машины в большинстве случаев характеризуются высокой конструктивной сложностью и, как следствие, низкой надежностью. В то же время, испытательные стенды, проектируемые на основе концепции независимо функционирующих мехатронных модулей, как правило, компактны, позволяют обеспечить сложные условия испытаний с требуемой точностью и достаточно просто перенастраиваются [3]. Такую концепцию мы использовали и при разработке стенда для испытаний протезов нижних конечностей человека.

Условия испытаний протезов (трансфеморальных, транстибиальных, искусственных стоп) должны соответствовать ГОСТ Р ИСО 10328 - 2007 [4] с учетом прикладываемых к ним статических и динамических нагрузок. Испытаниям подлежат как отдельные элементы (модули), так и протез в целом. В качестве примера на **Рис.1** показана схема трансфеморального протеза с указанием точек и линий прикладываемых усилий, определяющих условия

нагружения вида II [4]. Для создания испытательного стенда, способного обеспечить указанные условия, выбран вариант конструкции на основе механизма параллельной структуры, известного как платформа Гью-Стюарта.

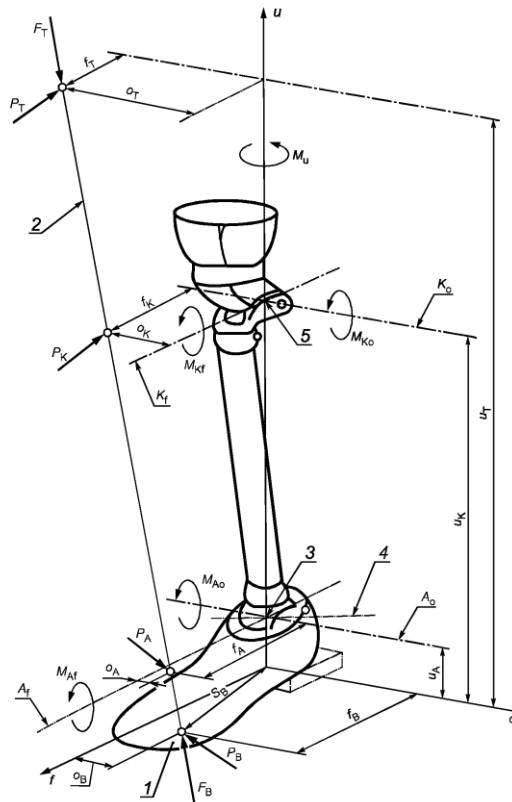


Рис.1 – Условия нагружения II трансформального протеза в процессе испытаний по ГОСТ Р ИСО 10328 — 2007

На **Рис.1** приняты следующие обозначения: 1 – левосторонний образец протеза; 2 – линия нагружения; 3 – действительный центр голеностопного узла; 4 – действительная центральная линия голеностопного узла; 5 – действительный центр коленного узла; A_f – базовая линия момента M_{Af} – в голеностопном узле; A_o – базовая линия момента M_{Ao} в голеностопном узле; K_f – базовая линия момента M_{Kf} в коленном узле; K_o – базовая линия момента M_{Ko} в коленном узле и действительная центральная линия коленного узла; P_T – верхняя точка приложения нагрузки; P_K – базовая точка приложения нагрузки в коленном узле; P_A – базовая точка приложения нагрузки в голеностопном узле; P_B – нижняя точка приложения нагрузки

Стенд легко сопрягается со спортивной беговой дорожкой, что позволяет использовать его не только для испытаний протезов на прочность при действии статических и динамических нагрузок, но и для испытаний их функциональных возможностей, связанных, например, с работой систем управления интеллектуальными модулями. Фактически такая испытательная система представляет собой мехатронный комплекс, позволяющий обеспечить широкий спектр условий испытаний. При этом управление движениями элементов этой системы имеет решающее значение для обеспечения ее работоспособности.

В качестве приводов главного исполнительного механизма испытательного стенда были выбраны шесть электроцилиндров ЕРСО

компании FESTO, каждый из которых включает: шаговый двигатель, шариковинтовую передачу, датчик обратной связи и контроллер СММО-ST [6]. Усилие подачи, развиваемое одним приводом (Feed force), составляет 250Н, а общее усилие, развиваемое всеми приводами при параллельном движении платформы – 1500Н. Максимальный ход каждого исполнительного органа привода 100мм с точностью повторения (Repetition accuracy) ± 0.02 мм при скорости перемещения 150мм/сек. Управление каждым приводом осуществляется посредством интерфейсов контроллера.

Основная задача, которая должна быть решена для выполнения условий испытаний, состоит в одновременном управлении каждым из шести приводов платформы, чтобы обеспечить ей требуемую ориентацию и перемещение в шестимерном пространстве. Для этого испытательный цикл условно разбивается на конечное число кадров движения и исполнительный орган каждого привода реализует движения независимо от других, с собственной скоростью и ускорением. К окончанию каждого кадра все приводы должны приходить одновременно, т.е. реализуемые ими движения синхронизируются по времени.

Для решения первой части задачи синхронизации разработана математическая модель платформы с использованием компонентно-ориентированного языка программирования Modelica. На ее входах задаются желаемые для конкретного испытания законы движения платформы, на выходе – рассчитываются законы движения каждого из приводов для реализации таких движений. Эти законы модель возвращает в виде файла с таблицами, содержащими информацию о кадре движения, а именно: номер кадра, конечную координату, скорость и ускорение движения исполнительного органа каждого привода. Создан инструмент, позволяющий автоматически генерировать информацию, необходимую для синхронного управления движениями всех приводов платформы.

По существу, такая математическая модель позволяет оперативно решать обратную задачу кинематики платформы с учетом динамических параметров ее элементов. Однако она использовалась и для определения границ рабочего пространства с учетом ограничений движений шарниров приводов и дискретных перемещений исполнительных органов приводов, т.е. для решения одного из вариантов прямой задачи кинематики.

Для решения второй части задачи синхронизации было необходимо выбрать рациональный способ управления приводами платформы с учетом особенностей контроллеров СММО-ST, имеющих несколько интерфейсов управления: дискретный вход-выход и обмен через Ethernet. Через дискретный интерфейс управления возможно организовывать перемещения на основе 31 кадра, ранее записанных в память контроллера. Интерфейс Ethernet обеспечивает настройку контроллера СММО-ST через программу конфигурирования FCT (Festo Configuration Tool) и управление согласно проприетарного протокола CVE-FESTO (Control Via Ethernet).

Для обеспечения синхронного движения всех приводов их контроллеры подключаются к программируемому логическому контроллеру PLC CECC-D

(FESTO) [7] через коммутатор интерфейса Ethernet. Контроллер CECC-D является управляющим контроллером устройства и работает в процессе испытаний в режиме жесткого реального времени. Структурная схема управления платформой показана на **Рис.2**.

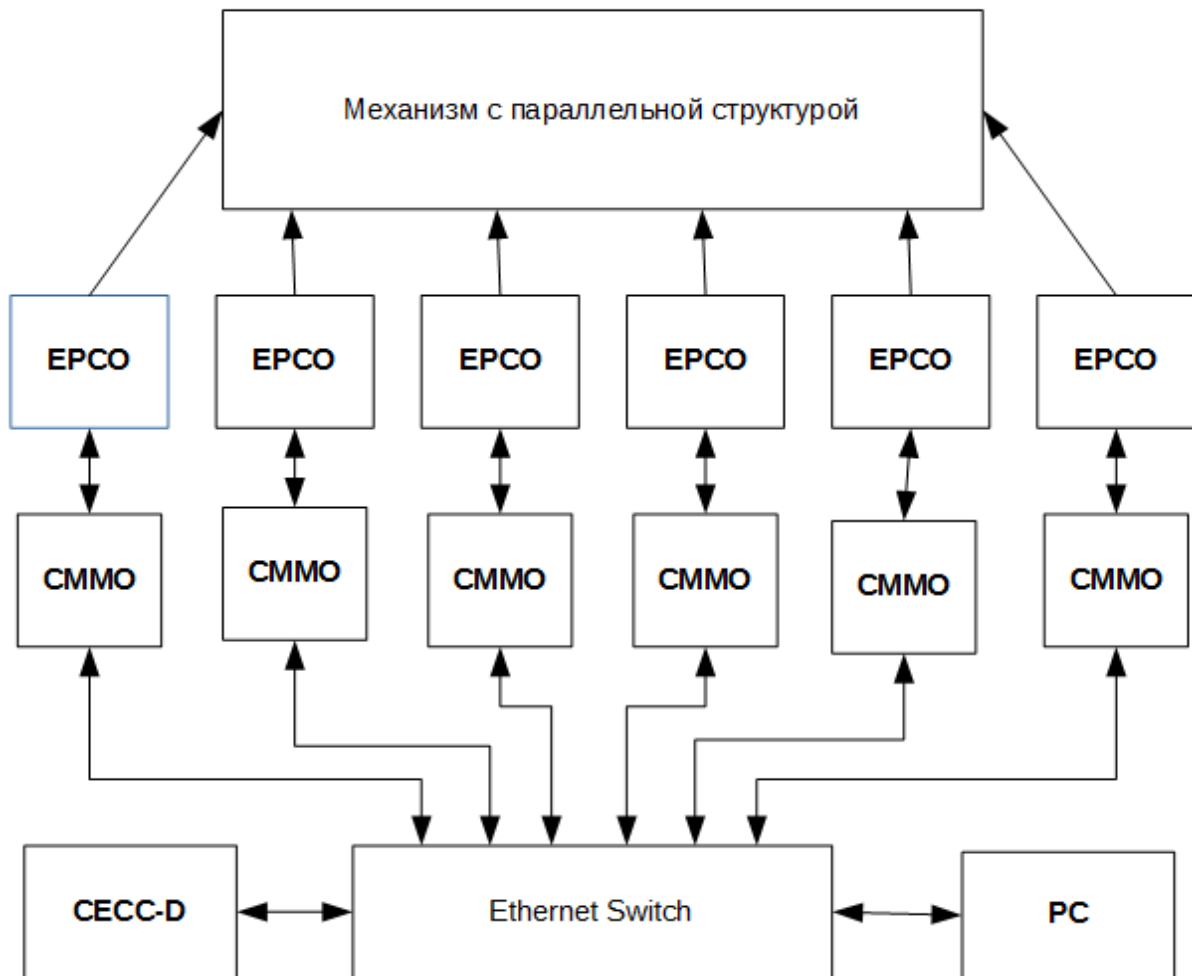


Рис.2 - Структурная схема управления платформой

Контроллер PLC CECC-D программируется согласно стандарту IEC61131-3 в среде CoDeSys 3.5. Пакет CECC Package for Codesys V3.5 содержит библиотеки программ работы контроллера по протоколу CVE-FESTO, который разработан фирмой FESTO как Real-Time Ethernet, применяемый в этом контроллере наряду с протоколом CANopen интерфейса CAN-Bus. Обмен данными между PLC и контроллерами приводов происходит через потоковые сокеты TCP/IP. Быстродействие канала определяется скоростью работы PLC и контроллерами приводов, а также скоростью коммутатора Ethernet. Для увеличения эффективной скорости работы канала необходимо выделить автономную сеть Ethernet между PLC и контроллерами приводов.

Важно отметить, что работа с сокетами не требует внесение в дерево устройства (Device CECC-D) элемента интерфейс Ethernet, так как механизм сокет автоматически его использует. Это означает, что интерфейс Ethernet в

Device может быть использован для подключения к вышестоящему устройству управления по полному стеку Ethernet, например по используя MODBUS TCP.



Рис.3 - Визуальная часть программы управления макетом

В процесс создания стенда разработан макетный образец, написана и отлажена программа, обеспечивающая линейные и угловые перемещения подвижной платформы в пространстве. На **Рис. 3** показано дерево программы макета и визуальная часть программы, которая организует пульт управления.

На **Рис. 4** приведен текст программного кода функции CMMO_CFC_1, которая обеспечивает управление приводом через сокет по протоколу CVE-FESTO, и текст программного кода основной программы PLC_PRG управления синхронным движением шестью приводами макетного образца.

Разработанное программное обеспечение позволяет выполнить эксперименты по управлению испытательным стендом на основе механизма параллельной структуры с шестью степенями свободы, которые показали, что режим реального времени при синхронном движении приводов возможен в случае, если кадры движения будут поступать не быстрее 20 мс. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при управлении реальной промышленной установкой [5].

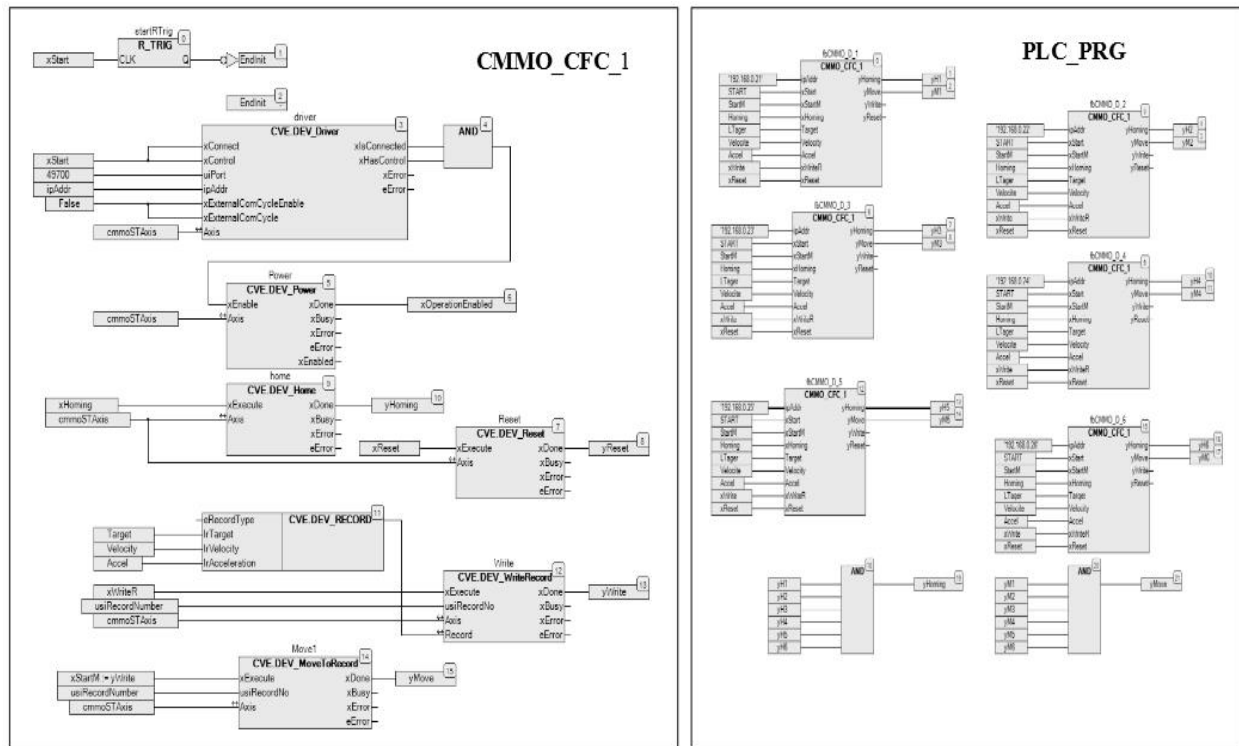


Рис. 4 - Код программы управления синхронным движением приводами

В настоящее время разрабатывается конструкторская документация для изготовления испытательного стенда, который будет использован в процессе реальных испытаний трансфеморального протеза с управляемым искусственным коленным суставом. Стенд предполагается также использовать для верификации динамических параметров искусственных стоп в трансфеморальных и транстибиальных протезах, а также для их испытаний на прочность под действием статических и динамических нагрузок.

Официальное подтверждение

Данная работа выполнена в соответствии с программой работ по проекту «Модернизация, настройка и подготовка к натурным испытаниям опытного образца активного трансфеморального протеза с интеллектуально-синергетической системой управления» в рамках внутреннего гранта ФГАО ВО «Севастопольский государственный университет» Идентификатор № 512/06-31.

Библиографический список

1. Poliakov, A. The concept of synthesis hinged mechanisms as a part of mechatronic systems/ A. Poliakov, M. Kolesova, O. Chepenyuk //Journal of Robotics and Mechanical Engineering Research. – 2015, Vol. 1, No 2. – P. 17-27.
2. Поляков, А.М. Оценка работоспособности мехатронных систем с механическими подсистемами в виде простейших механизмов с нелинейными

функциями положения/ А.М. Поляков, В.Б. Лазарев, В.И. Пахалюк //Вестник СевНТУ. Серия: Механика, энергетика, экология. – 2014, №148. – С. 233-239.

3. Poliakov, O. Stand and control system for wear testing of the spherical joints of vehicle suspension at complex loading conditions/ O. Poliakov, V. Pakhaliuk, V. Lazarev, P. Shtanko, Y. Ivanov //Control and Automation Theory for Transportation Applications. – 2013, Vol. 1, No 1. P. 106-11.

4. ГОСТ 10328-2007 – Протезирование. Испытания конструкции протезов нижних конечностей. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2007. – 122 с.

5. Gomolka, W. CVE: Control via Ethernet. An alternative approach to motion control over Industrial Ethernet/ W. Gomolka //Festo France. – 2014. – 11 p.

6. Контроллер двигателя CMMO-ST. Описание. Festo AG & Co. KG. www.festo.com/net/SupportPortal/Files/466640/CMMO-ST-EA-S1_2017-05d_8071656r1.pdf (дата обращения: 15.07.2019).

7. Компактный блок управления Festo CECC CODESYS® V3. Festo AG & Co. KG. www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_ru/PDF/RU/CECC_RU.PDF. (дата обращения: 15.07.2019).

Bibliograficheskiy spisok

1. Poliakov, A. The concept of synthesis hinged mechanisms as a part of mechatronic systems/ A. Poliakov, M. Kolesova, O. Chepenyuk //Journal of Robotics and Mechanical Engineering Research. – 2015, Vol. 1, No 2. – P. 17-27.

2. Polyakov, A.M. Ocenka rabotosposobnosti mekhatronnykh sistem s mekhanicheskimi podsistemami v vide prosteyshih mekhanizmov s nelinejnymi funkciyami polozheniya/ A.M. Polyakov, V.B. Lazarev, V.I. Pahalyuk //Vestnik SevNTU. Seriya: Mekhanika, energetika, ekologiya. – 2014, №148. – S. 233-239.

3. Poliakov, O. Stand and control system for wear testing of the spherical joints of vehicle suspension at complex loading conditions/ O. Poliakov, V. Pakhaliuk, V. Lazarev, P. Shtanko, Y. Ivanov //Control and Automation Theory for Transportation Applications. – 2013, Vol. 1, No 1. P. 106-11.

4. GOST 10328-2007 – Protezirovanie. Ispytaniya konstrukcii protezov nizhnih konechnostej. Trebovaniya i metody ispytaniy. M.: Standartinform, 2007. – 122 с.

5. Gomolka, W. CVE: Control via Ethernet. An alternative approach to motion control over Industrial Ethernet/W. Gomolka//Festo France. – 2014. – 11 p.

6. Контроллер двигателя CMMO-ST. Описание. Festo AG & Co. KG. www.festo.com/net/SupportPortal/Files/466640/CMMO-ST-EA-S1_2017-05d_8071656r1.pdf (data obrashcheniya: 15.07.2019).

7. Kompaktnyj blok upravleniya Festo CECC CODESYS® V3. Festo AG & Co. KG. www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_ru/PDF/RU/CECC_RU.PDF. (data obrashcheniya: 15.07.2019).

Лазарев Виктор Борисович, ведущий инженер, Севастопольский государственный университет.

Поляков Александр Михайлович, к.т.н, доцент, Севастопольский государственный университет.

Сопин Павел Константинович, к.т.н, доцент, Севастопольский государственный университет.

Картавенко Анастасия Александровна, студент 3 курса, Севастопольский государственный университет.

*THE SIMULTANEOUS MOVEMENTS OF THE EXECUTIVE BODIES OF
THE ACTUATOR EPCO OF FESTO IN THE STAND FOR TESTING OF
TRANSFEMORAL PROSTHESES.*

Lazarev V.B., Polykov A.M., Sopin P.K., Kartavenko A.A.

The article contains a description of methods for synchronizing the operation of the drives of a device with a parallel mechanical structure. A method for obtaining control data using a mathematical model of the device is proposed. The model for demonstration of the offered methods and ways is described.

Keys word: transfemoral prosthesis, Tests, Hugh-Stewart Platform, CVE Protocol, TCP/IP Sockets

Lazarev Viktor Borisovich, leading engineer, Sevastopol state University.

Alexander M. Polyakov, Ph. D., associate Professor, Sevastopol state University.

Sopin Pavel Konstantinovich, Ph. D., associate Professor, Sevastopol state University.

Anastasia Kartavenko, 3rd year student, Sevastopol state University.

АНАЛИЗ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕЗЬБОШЛИФОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РЕЗЬБОНАКАТНЫХ РОЛИКОВ

Липка В.М.¹, Братан С.М.², Рапацкий Ю.Л.³

***Аннотация.** Исследуется процесс шлифования наружной резьбы на резьбонакатных роликах. Шлифование однониточным кругом позволяет получать наиболее точную наружную резьбу, но повышение производительности процесса, обеспечение качества, стабильности профиля и шага, предотвращение прижогов и других дефектов остается актуальной задачей. По результатам экспериментальных исследований предлагается рациональный вариант выбора параметров резьбошлифования, в т.ч. глубины резания. Предлагаемый вариант позволяет существенно повысить производительность процесса резьбошлифования без потери качества резьбовой поверхности.*

***Ключевые слова.** Резьбошлифование, резьбонакатные ролики, износ абразивного круга.*

Анализ исследований и публикаций. В современных условиях детали с резьбой, применяемые в высоконагруженных (4g, 3g), а также высокоточных резьбовых соединениях должны удовлетворять совокупности непрерывно возрастающих требований, ключевыми среди которых являются надежность, механические свойства, геометрическая точность, коррозионно- и фреттингостойкость и ряд других [1, 2]. Надежность деталей машин, в т.ч. входящих в состав резьбовых соединений, исследуется многими авторами, в частности в [3, 4], но выработать рекомендации по устранению причин возникновения отказов изделий в процессе эксплуатации пока не представляется возможным. Наиболее широко в высоконагруженных резьбовых соединениях применяются болты и шпильки с метрическими резьбами М6...М14.

Высокоэффективным способом получения наружных резьб в серийном и массовом производстве является накатывание на двухроликовых станках [5, 6, 7, 8, 9]. Применение резьбонакатывания для изготовления крепежных деталей с наружной резьбой возможно также в мелкосерийном и единичном производстве, в т.ч. с помощью трехроликовых резьбонакатных головок, устанавливаемых на токарных станках [5]. Как показано в [5, 10], решающее влияние на точностные характеристики резьбовых деталей с наружной резьбой оказывает процесс резьбонакатывания. Кроме того, упрочнение резьбовой поверхности в процессе пластического деформирования при резьбонакатывании существенно повышает механические характеристики деталей с наружной резьбой [5]. Вместе с тем, технологическая наследственность [10] на операции накатывания наружных резьб проявляется в наследовании негативных признаков от предыдущих этапов технологического

процесса, а также в воспроизведении на резьбовых деталях дефектов, имеющих на рабочей поверхности резьбонакатных роликов [11]. В большинстве случаев жесткость станка для накатывания резьбы можно считать достаточной, в связи с чем качество деталей с наружной резьбой непосредственно зависит от точности и стойкости резьбонакатных роликов, при условии, что заготовки для резьбонакатывания соответствуют установленным требованиям по механическим свойствам материала, а также форме и размерам. Процесс изготовления высококачественных резьбонакатных роликов является дорогостоящим, сложным, трудоемким, себестоимость одной пары в большинстве случаев превышает 25 000 руб. Наиболее высокую точность рабочей поверхности резьбонакатных роликов возможно обеспечить путем шлифования резьбовой канавки одноконтурным шлифовальным кругом [12, 13].

Более производительным, но менее точным способом получения резьбовой поверхности является шлифование многоконтурным кругом [13]. В настоящее время, как правило, применяют один из двух вариантов технологии изготовления высокоточных резьбонакатных роликов, первый из которых предполагает предварительное протачивание резьбовой канавки по закаленной заготовке резцом с пластиной из сверхтвердого материала, затем окончательное шлифование одноконтурным кругом, а второй не предусматривает токарной обработки [13]. При резьбошлифовании резьбонакатных роликов необходимо обеспечивать высокую точность и качество резьбовой поверхности, в т.ч. отсутствие прижогов, а также приемлемую производительность и себестоимость [5, 6, 12, 13]. Таким образом, технологическое обеспечение изготовления резьбонакатных роликов, имеющих высокую точность и стойкость, остается достаточно сложной проблемой. Несмотря на большое количество исследований и публикаций по изготовлению высококачественного резьбонакатного инструмента, задача до настоящего времени остается актуальной.

Цель исследований – анализ и сравнение результатов экспериментального и расчетного определения износа шлифовального круга при различных способах задания параметров шлифования резьбовой канавки на заготовке резьбонакатного ролика.

Изложение основного материала. Шлифование резьбы на заготовках резьбонакатных роликов в ходе экспериментальных исследований производилось с помощью резьбошлифовального станка высокой точности 5K822B. Для высокоточного резьбошлифования возможно также применение станков ВЗ-678Ф4, ОШ-633Ф3 и других, с аналогичными техническими характеристиками. Для экспериментальных исследований использовались ШК диаметром 400 мм марки 4 400x10x203 60, с характеристиками 25A180P10V501AA по ГОСТ Р 52781-2007. Цилиндрические заготовки резьбонакатных роликов для накатывания метрической резьбы М10x1,25-4g длиной 64 мм изготовлены из стали Х6ВФ ГОСТ 5950-73, предварительно прокованы для получения балла карбидной неоднородности 3-4, проточены, закалены до твердости 58...61 по HRC и прошлифованы до наружного диаметра 147,730 мм.

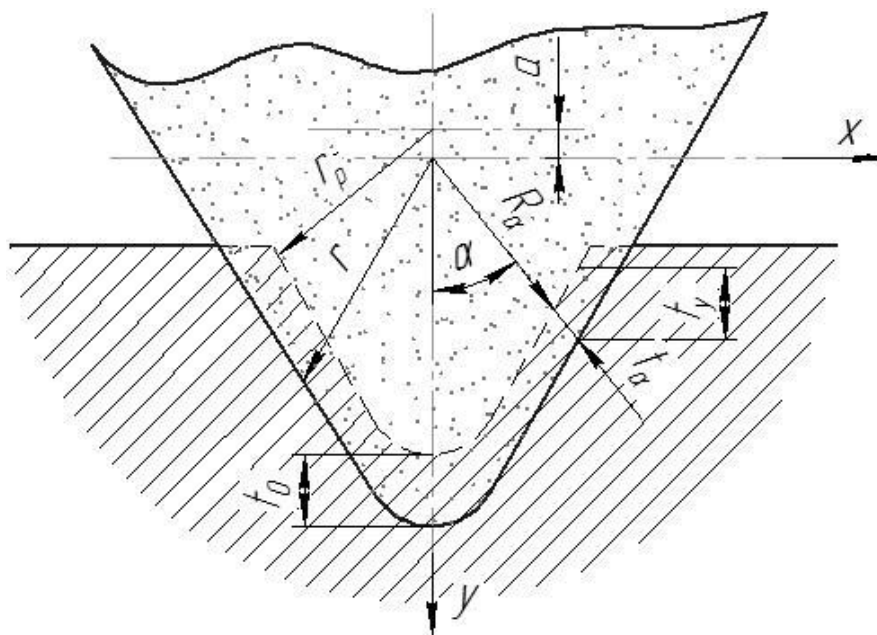


Рис.1 – Схема взаимодействия одностороннего резбошлифовального круга с заготовкой при шлифовании метрической резьбы на рабочей поверхности резбонакатного ролика, t_α – значение глубины резания в зависимости от угла α между осью OY и радиус-вектором R_α ; t_0 – глубина резания на вершине профиля шлифовального круга; t_y – проекция глубины резания на ось OY; r_p – значение радиуса профиля резьбы, поступающей на операцию резбошлифования; r – радиус вершины рабочей части шлифовального круга.

На **Рис.1** показана схема взаимодействия рабочей части одностороннего шлифовального круга с заготовкой резбонакатного ролика в процессе резбошлифования. В ходе эксперимента применялись следующие режимы шлифования: скорость вращения заготовки 0,6...2,0 м/мин, радиальная подача 0,03...0,08 мм/ход, при окончательной обработке 0,02...0,04 мм/ход, в т.ч. на последних ходах 0,01 мм/ход. В качестве смазывающе-охлаждающей жидкости использовалось масло «Индустриальное-20» с присадкой «Волжская-100» в количестве 20%, по рекомендациям, приведенным в [13]. Правка производилась алмазным карандашом типа 04 по ГОСТ 607-80 с автоматической подачей, обеспечиваемой приспособлением, установленным на станке.

Наилучшие результаты по точности профиля резьбы, стойкости круга и фактической производительности процесса резбошлифования были получены при обработке шлифовальным кругом 1E6Q400x10x203 60° ЛКВ4028/20100СТ1К2750, абразивный материал – кубический нитрид бора. Вместе с тем, для рассматриваемого технологического процесса, суммарные затраты, связанные с применением шлифовального круга из кубического нитрида бора, на 10-15% выше, чем при использовании кругов из электрокорунда, в связи с необходимостью частых правок.

Результаты экспериментальных исследований по определению износа одноконтурных шлифовальных кругов, размеры 4 400x10x230 60 характеристики 25A180P10V501AA по ГОСТ Р 52781-2007 при шлифовании резьбы на рабочей поверхности закаленных заготовок резбонакатных роликов из стали Х6ВФ ГОСТ 5950-73 при различных распределениях глубины резания t_α по профилю круга сведены в таблицу 1, в ней также приведены расчетные значения изменения радиуса профиля круга, полученные на основе соотношения [14]:

$$u = c_u t^x s^y v^z, \quad (1)$$

где c_u - коэффициент, учитывающий свойства материала заготовки, смазывающе-охлаждающей жидкости и параметры шлифовального круга, в т.ч. абразивный материал, его зернистость, применяемую связку и другие характеристики инструмента; t, s, v - соответственно, глубина резания, подача, скорость резания; x, y, z - соответственно, показатели степеней.

Из анализа результатов, приведенных в таблице 1, видно, что экспериментальные значения изменения радиуса вершины шлифовального круга Δr не совпадают с расчетными, на боковых участках профиля износ круга меньше расчетного значения. Можно предположить, что на интенсивность износа боковых участков профиля шлифовального круга оказывают влияние факторы, влияние которых приводит к заметному искажению формы резьбовой канавки, что недопустимо, исходя из высоких требований к качеству рабочей поверхности резбонакатных роликов.

Таблица 1.- Результаты экспериментального и расчетного определения износа одноконтурных шлифовальных кругов 4 400x10x230 60 25A180P10V501AA по ГОСТ Р 52781-2007 при шлифовании резьбы на рабочей поверхности закаленных до HRC 58...61 заготовок резбонакатных роликов из стали Х6ВФ ГОСТ 5950-73

Исследуемые варианты схем шлифования		Значения размерного износа вершины шлифкруга u_0 , мм			Значения изменения радиуса вершины шлифкруга Δr , мм		
		t_0 , мм					
		0,05	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15
$r_p = r$	экспер.	0,008	0,023	0,052	0,011	0,023	0,057
	расчет.	-	-	-	0,0025	0,009	0,014
$r_p = r - 0,3t_0$	экспер.	0,011	0,027	0,049	0,003	0,0095	0,023
	расчет.	-	-	-	0	0	0
$r_p = r - t_0$	экспер.	0,012	0,030	0,053	-0,004	-0,011	-0,20
	расчет.	-	-	-	-0,012	-0,030	-0,053

Основными факторами, влияющими на интенсивность износа круга, являются глубина резания t , скорость заготовки v , длина дуги контакта L ,

скорость резания v_k , характеристика шлифовального круга, механические свойства стали, из которой выполнена заготовка, а также параметры смазывающе-охлаждающей жидкости. Переменными по обрабатываемому профилю являются глубина резания t_α и длина дуги контакта L_α . Зависимость (1) была получена при шлифовании плоских и цилиндрических поверхностей периферией круга [14]. В этом случае длина дуги контакта $L = \text{const}$, и ее влияние на износ круга в уравнении (1) не отражено. В процессе резбошлифования одноконтурным шлифовальным кругом величина дуги контакта, как правило, не является постоянной по профилю круга, переменными могут быть длина пути скольжения зерен по поверхности металла, время тепловых воздействий на зерна, толщина стружки, снимаемой одним зерном. Указанные факторы, согласно результатам, приведенным в [15], оказывают существенное влияние на износ шлифовальных кругов. Вместе с тем, из таблицы 1 видно, что при шлифовании резьбы по схеме $r_p = r$ длина дуги контакта L_α постоянна по профилю круга, а экспериментальные значения $\overline{\Delta r}$ заметно отличаются от расчетных. Следовательно, на износ круга оказывают влияние условия контактирования зерен круга с заготовкой резбонакатного ролика. Как правило, зерна, работающие на периферии круга, имеют меньший радиус закругления вершины, более острые кромки и обладают меньшей прочностью. Износ зерен на вершине шлифовального круга происходит не только за счет истирания, но и путем микро- и макроразрушения в результате действия сил сопротивления металла и термических явлений в процессе резбошлифования.

Зерна, находящиеся на боковых участках профиля круга, имеют, в большинстве случаев, более тупую вершину, обладают большой прочностью и изнашиваются преимущественно за счет истирания. Вследствие этого, при прочих равных условиях, они изнашиваются медленнее, чем зерна, расположенные на вершине профиля круга. Указанные различия приводят к тому, что математическую модель процесса, записанную в виде $a = kt_0$ необходимо уточнить на основании экспериментальных данных. Была увеличена глубина резания t_α на боковых участках профиля круга, длина дуги контакта L_α , а, следовательно, длина пути скольжения и время тепловых воздействий на зерна. Указанное изменение привело к увеличению интенсивности износа боковых участков рабочей части профиля шлифовального круга. Анализ полученных экспериментальных зависимостей $\overline{\Delta r} = f(A)$ показывает, что при шлифовании резьбы по схеме $r_p = r - 0,54t_0$ глубина резания практически не влияет на характер износа профиля круга. Используя результаты, полученные в [16], определим значение глубины резания на боковых участках профиля круга

$$t_\alpha = r - \left(\sqrt{r_p'^2 - a'^2 \sin^2 \alpha} - a' \cos \alpha \right). \quad (2)$$

Так как $r'_p = r - t_0 + a = r - 0,54t_0$, то $a' = 0,46t_0$. Подставим значения r'_p и a' в выражение (2), получим

$$t_\alpha = r + 0,46t_0 \cos \alpha - \sqrt{(r - 0,54t_0)^2 - (0,46t_0)^2 \sin^2 \alpha}.$$

Разделим обе части полученного уравнения на t_0 и получим отношение $\frac{t_\alpha}{t_0}$, характеризующее изменение глубины резания t_α по профилю круга:

$$\frac{t_\alpha}{t_0} = \frac{r}{t_0} + 0,46 \cos \alpha - \sqrt{\left(\frac{r}{t_0} - 0,54\right)^2 - (0,46)^2 \sin^2 \alpha}.$$

Поскольку имеет место $\frac{r}{t_0} > 10$, то $\left(\frac{r}{t_0}\right)^2 \gg (0,46)^2 \sin^2 \alpha$.

Тогда можно записать:

$$\frac{t_\alpha}{t_0} = 0,46 \cos \alpha + 0,54 = 0,54(1 + 0,85 \cos \alpha). \quad (3)$$

Следовательно, характер изменения глубины резания по профилю круга не зависит от величины глубины резания. Из уравнения (3) получим:

$$t_\alpha = 0,54t_0(1 + 0,85 \cos \alpha). \quad (4)$$

Из уравнения (4) находим значение износа круга на вершине профиля:

$$u_0 = c_{u0} t_0^x S_0^y \nu_0^z, \quad (5)$$

а также на боковых участках

$$u_\alpha = c_{u\alpha} t_\alpha^x S_\alpha^y \nu_\alpha^z. \quad (6)$$

Так как при резбошлифовании по схеме $r_p = r - 0,54t_0$, изменения радиуса вершины шлифовального круга $\overline{\Delta r} = 0$, то из выражения (6) можно определить величину износа круга на боковых участках следующим образом: $u_\alpha = u_0 \cos \alpha$. Подставляя в выражение (6) значение t_α из соотношения (4) и учитывая, что $S_\alpha = S_0$ и $u_\alpha \approx u$, получим

$$u_\alpha = c_{u_\alpha} [0,54t_0(1 + 0,85 \cos \alpha)]^x S_0^y \nu_0^z.$$

С учетом того, что $u_\alpha = u_0 \cos \alpha$, с помощью уравнения (5) получим

$$u_\alpha = c_{u_\alpha} [0,54t_0(1 + 0,85 \cos \alpha)]^x S_0^y \nu_0^z = C_{u_0} t_0^x S_0^y \nu_0^z \cos \alpha.$$

Отсюда

$$C_{u_{\alpha}} = \frac{C_{u_0} \cos \alpha}{[0,54(1 + 0,85 \cos \alpha)]^x}. \quad (7)$$

Таким образом, зависимость износа круга на боковых участках профиля от глубины резания t_{α} аналогична зависимости износа вершин профиля от глубины резания t_0 . Однако коэффициент $C_{u_{\alpha}}$ в выражении (6) изменяется в зависимости от угла α согласно зависимости (7).

По данным износа шлифовального круга в процессе резбошлифования, представленным в таблице 1, получим значения коэффициента $C_{u_{\alpha}}$ в зависимости от угла α , представленные в таблице 2.

Таблица 2 - Значения коэффициента $C_{u_{\alpha}}$ в зависимости от угла α

Угол α	0°	30°	45°	60°
$C_{u_{\alpha}}$	1	0,97	0,90	0,77

Таким образом, из данных, приведенных в таблице 2, следует, что износ круга u_{α} при прочих равных условиях ($t_{\alpha} = t_0$) с увеличением угла α уменьшается и при $\alpha = 60^\circ$ составит 77% от износа круга u_0 на вершине профиля.

Статистический анализ результатов экспериментов показал, что стабильность процесса шлифования, оцениваемая по величине дисперсий распределения Δr , ухудшается с увеличением глубины резания. Это явление можно объяснить изменением характера износа абразивного круга при увеличении глубины резания и неоднородностью физико-механических свойств по его объему [13].

При шлифовании с малой интенсивностью съема металла износ круга происходит главным образом за счет скалывания острых вершин, кромок абразивных зерен в начале работы и затем путем их истирания обрабатываемый материал [17]. При увеличении глубины резания увеличивается силовые и тепловые воздействия на зерна круга. В результате происходит частичное разрушение наиболее слабых и нагруженных зерен, режущие кромки обновляются. Затем происходит их затупление, частичное разрушение и т.д. Этот вид износа сочетает в себе износ зерен истиранием и частичным разрушением – их самозатачиванием. При дальнейшем увеличении глубины резания возросшие силы резания могут привести не только к разрушению абразивных зерен, но и к их вырыву из связки. Круг начинает работать в режиме самозатачивания [18, 19].

Вид износа круга при прочих равных условиях зависит от его физико-механических характеристик: прочности зерен и связки, способности зерен к микроскалыванию, их термостойкости и прочие. Свойства абразивного инструмента являются совокупностью случайных величин, что не способствует стабильности его характеристик в процессе шлифования, поэтому

интенсивность износа кругов одной маркировки неизбежно будет различной. Вместе с тем, чем больше силовые и тепловые воздействия на зерна круга, тем больше вероятность перехода одного вида износа в другой и увеличения поля рассеивания интенсивности износа круга. Шлифование является одним из наиболее стохастичных процессов механической обработки деталей [17, 18]. Проблемы рационального выбора условий и параметров обработки сложных ответственных деталей рассматриваются многими авторами, в т.ч. в [6, 8, 13, 19, 20], но выработка универсальных рекомендаций маловероятна.

Разработанная схема шлифования $r_p = r - 0,54t_0$ позволяет до минимума уменьшить средние значения радиуса профиля круга, однако поля рассеивания значений Δr остаются неизменными.

Для оценки максимальной глубины резания, при которой может быть достигнута необходимая точность профиля резьбы, по имеющимся экспериментальным данным, построим графические зависимости изменения Δr и полей рассеивания $\Delta = 6S$ от глубины резания t_0 при шлифовании по существующей схеме $r_p = r$ и предлагаемой $r_p = r - 0,54t_0$, результаты показаны на **Рис.2**. Из **Рис.2** видно, что при шлифовании по схеме $r_p = r$ требуемая точность радиуса профиля резьбы с шагом 1,25 мм (допуск $\delta_r = 0,005$ мм) обеспечивается при глубине резания $t_0 \leq 0,014$ мм, а при шлифовании по схеме $r_p = r - 0,54t_0$ — при $t_0 \leq 0,05$ мм. Анализ результатов применения различных схем резьбошлифования при изготовлении резьбонакатных роликов показал, что вариант $r_p = r - 0,54t_0$ позволяет обеспечить более, чем трехкратное увеличение производительности, без снижения точности профиля резьбы.

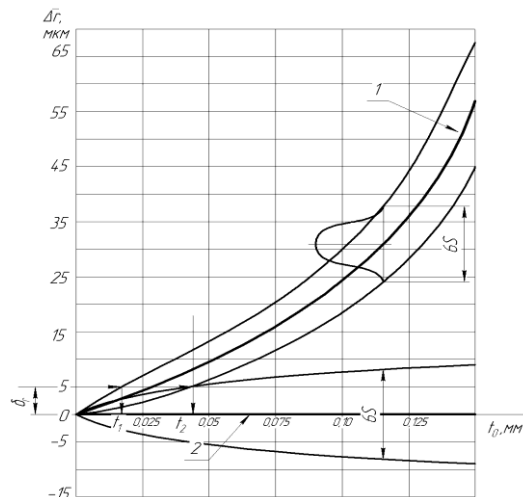


Рис.2 – Изменение радиуса профиля шлифовального круга Δr в зависимости от глубины резания t_0 при резьбошлифовании заготовок резьбонакатных роликов: по схеме $r_p = r$ (график 1) и по схеме $r_p = r - 0,54t_0$ (график 2).

Выводы. Из анализа графиков, приведенных на **Рис.2**, видно, что резбошлифование по разработанной схеме позволяет уменьшить изменения радиуса профиля круга не менее, чем в три раза по сравнению с традиционной схемой обработки и во столько же раз уменьшить изменения радиуса профиля резьбы по длине рабочей части обрабатываемой заготовки резбонакатного ролика, что дает возможность значительно снизить негативное влияние искажений профиля шлифуемой резьбы на качество готовых инструментов. Кроме того, для повышения точности профиля резьбы по длине рабочей части резбонакатного ролика необходимо уменьшить глубину резания до значения не более 0,05 мм (для рассматриваемого примера), что позволяет уменьшить не только величину изменения радиуса профиля круга, но и поле ее рассеивания.

Проведенные исследования позволяют осуществлять рациональный выбор параметров резбошлифования, в т.ч. глубины резания, исходя из требуемой стабильности профиля резьбы при обработке рабочих поверхностей резбонакатных роликов. Полученные результаты могут применяться в инструментальном производстве при изготовлении высокоточных резбонакатных роликов и других подобных изделий с наружной резьбой, с учетом стоимости их жизненного цикла [21]. **Направление дальнейших исследований** связано с анализом стохастического характера процессов изготовления резбонакатных инструментов и резьбовых деталей.

Библиографический список

1. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Рапацкий, Ю.Л. Анализ факторов, вызывающих релаксацию и разрушение резьбовых соединений в изделиях машиностроения / Ю.Л. Рапацкий, В.М. Липка // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. – Орел: изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева, 2017 – №4 – 1 – (324) – С.75-80.
3. Рапацкий, Ю.Л. Моделирование с помощью метода конечных элементов и исследование влияния силовых нагрузок на надежность резьбовых соединений в силовых агрегатах автомобилей / Ю.Л. Рапацкий, В.Я. Копп, В.М. Липка, В.В. Леонтьев // Вестник СевНТУ: сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – Вып. 146. – С. 14–20.
4. Анцупов, В.П. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов / В.П. Анцупов, Л.Т. Дворников, Д.Г. Громаковский // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. – №1 – С.141-146.
5. Киричек, А.В. Резбонакатывание.: Библиотека технолога. / Киричек А.В., Афонин А.Н. – М.: Машиностроение, 2009.-312 с.
6. Якухин, В.Г. Высокотехнологичные методы металлообработки.: Учебник. / Якухин В.Г., О.В. Таратынова // М.: МГИУ, 2011. –362 с.
7. Афонин, А.Н. Схемы деформирования при накатывании резьб / А.Н. Афонин, А.В. Киричек // Известия ОрелГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: сб. науч. тр. — Орел: Изд-во

ОГУ им. И.С. Тургенева, 2009. — Вып. 6/278 (577). — С. 39–42.

8. Бугай, И.А. Исследование накатывания резьбы на заготовках из труднообрабатываемых материалов / И.А. Бугай, А.Ю. Попов, О.П. Евдокимова, П.В. Назаров, П.Е. Попов, К.С. Петроченко, М.А. Тотик, А.И. Дацько // Динамика систем, механизмов и машин. — 2017. — Омск: Омский государственный технический университет. — Т.5. — №1. — С.93-96.

9. Липка, В.М. Исследование надежности процесса накатывания наружных резьб с учетом взаимосвязанных отказов / В.М. Липка, С.М. Братан, Ю.Л. Рапацкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. Орел: изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева. — 2018. — №4-2-(330) 2018-12-23. — С.198-206.

10. Аверченков, В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб. пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. — М.: «Флинта», 2016. — 271 с.

11. Липка, В.М. Анализ воздействия технологической наследственности при изготовлении деталей с резьбой на надежность резьбовых соединений в судовых машинах и механизмах / Липка В.М., Рапацкий Ю.Л. // Ушаковские чтения: Материалы Пятой Межвузовской научно-практической конференции (Севастополь, 22-23 февраля 2018 г.). — Севастополь: ООО «ПК КИА», 2018. — С.61-69.

12. Глясс В.Д., Кудасов Г.Ф. Резьбошлифование. — Л.: Машгиз, 1960. — 64 с.

13. Кремень, З.И. Технология шлифования в машиностроении / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин: под общ. ред. З.И. Кремня. — СПб.: Политехника, 2007. — 424 с.

14. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. — Л.: Машиностроение, 1973. — 136 с.

15. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. / Под ред А.М. Резникова. — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с.

16. Липка, В.М. Повышение надежности резьбонакатных роликов, изготавливаемых методом резьбошлифования / В.М. Липка, С.М. Братан, Ю.Л. Рапацкий // Вестник современных технологий. Сборник научных трудов, 2018. — №4 (12). — С.49-57.

17. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. — 232 с.

18. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности инструмента. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. — 160 с.

19. Курдюков В.И. Основы абразивной обработки. — Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. — 195 с.

20. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н. Определение рациональных условий обработки при производстве деталей ГТД. — Самара: Самарский научный центр РАН, 2002. — 152 с.

21. Дьяков, А.М. Оптимизация эксплуатационных процессов путем управления стоимостью жизненного цикла продукции / А.М. Дьяков, Д.В.

Решетников // Фундаментальные исследования. – 2014. №8(7) – С. 1528 – 1532.

Bibliograficheskiy spisok

1. 1. Inzheneriya poverhnosti detalej / pod red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s.
2. Rapackij, YU.L. Analiz faktorov, vyzyvayushchih relaksaciyu i razrushenie rez'bovyh soedinenij v izdeliyah mashinostroeniya / YU.L. Rapackij, V.M. Lipka // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii: nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – Orel: izd-vo OGU im. I.S. Turgeneva, 2017 – №4 – 1 – (324) – S.75-80.
3. Rapackij, YU.L. Modelirovanie s pomoshch'yu metoda konechnyh elementov i issledovanie vliyaniya silovyh nagruzok na nadezhnost' rez'bovyh soedinenij v silovyh agregatah avtomobilej / YU.L. Rapackij, V.YA. Kopp, V.M. Lipka, V.V. Leont'ev // Vestnik SevNTU: sb. nauch. tr. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – Vyp. 146. – S. 14–20.
4. Ancupov, V.P. Osnovy fizicheskoy teorii nadezhnosti detalej mashin po kriteriyam kineticheskoy prochnosti materialov / V.P. Ancupov, L.T. Dvornikov, D.G. Gromakovskij // Vestnik MGTU im. G.I. Nosova, 2014. – №1 – S.141-146.
5. Kirichek, A.V. Rez'bonakatyvanie.: Biblioteka tekhnologa. / Kirichek A.V., Afonin A.N. – M.: Mashinostroenie, 2009.-312 s.
6. YAkuhin, V.G. Vysokotekhnologichnye metody metalloobrabotki.: Uchebnik. / YAkuhin V.G., O.V. Taratynova // M.: MGIU, 2011. –362 s.
7. Afonin, A.N. Skhemy deformirovaniya pri nakatyvanii rez'b / A.N. Afonin, A.V. Kirichek // Izvestiya OrelGTU. Ser. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii: sb. nauch. tr. — Orel: Izd-vo OGU im. I.S. Turgeneva, 2009. — Vyp. 6/278 (577). — S. 39–42.
8. Bugaj, I.A. Issledovanie nakatyvaniya rez'by na zagotovkah iz trudnoobrabatyvaemyh materialov / I.A. Bugaj, A.YU. Popov, O.P. Evdokimova, P.V. Nazarov, P.E. Popov, K.S. Petrochenko, M.A. Totik, A.I. Dac'ko // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. – 2017. – Omsk: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. – T.5. – №1. – S.93-96.
9. Lipka, V.M. Issledovanie nadezhnosti processa nakatyvaniya naruzhnyh rez'b s uchetom vzaimosvyazannyh otkazov / V.M. Lipka, S.M. Bratan, YU.L. Rapackij // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii: nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Orel: izd-vo OGU im. I.S. Turgeneva. – 2018. – №4-2-(330) 2018-12-23. – S.198-206.
10. Averchenkov, V.I. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie / V.I. Averchenkov, V.P. Fedorov, M.L. Hejfec. – M.: «Flinta», 2016. – 271 s.
11. Lipka, V.M. Analiz vozdejstviya tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri izgotovlenii detalej s rez'boj na nadezhnost' rez'bovyh soedinenij v sudovyh mashinah i mekhanizmah / Lipka V.M., Rapackij YU.L. // Ushakovskie chteniya:

Materialy Pyatoj Mezhdvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Sevastopol', 22-23 fevralya 2018 g.). – Sevastopol': ООО «PK KIA», 2018. – S.61-69.

12. Glyass V.D., Kudasov G.F. Rez'boshlifovanie. – L.: Mashgiz, 1960. – 64 s.

13. Kremen', Z.I. Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii / Z.I. Kremen', V.G. YUr'ev, A.F. Baboshkin: pod obshch. red. Z.I. Kremnya. – SPb.: Politekhnik, 2007. – 424 s.

14. Filimonov L.N. Stojkost' shlifoval'nyh krugov. – L.: Mashinostroenie, 1973. – 136 s.

15. Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov. Spravochnik. / Pod red A.M. Reznikova. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 391 s.

16. Lipka, V.M. Povyshenie nadezhnosti rez'bonakatnyh rolikov, izgotavlivaemyh metodom rez'boshlifovaniya / V.M. Lipaka, S.M. Bratan, YU.L. Rapackij // Vestnik sovremennyh tekhnologij. Sbornik nauchnyh trudov, 2018. – №4 (12). – S.49-57.

17. Novoselov, YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke. – Saratov: Izd-vo Saratov. un-ta, 1979. – 232 s.

18. Korolev A.V., Novoselov YU.K. Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoj obrabotki. CHast' 1. Sostoyanie rabochej poverhnosti instrumenta. – Saratov: Izd-vo Saratov. un-ta, 1987. – 160 s.

19. Kurdyukov V.I. Osnovy abrazivnoj obrabotki. – Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 2014. – 195 s.

20. Skuratov D.L., Trusov V.N. Opredelenie racional'nyh uslovij obrabotki pri proizvodstve detalej GTD. – Samara: Samarskij nauchnyj centr RAN, 2002. – 152 s.

21. D'yakov, A.M. Optimizaciya ekspluatacionnyh processov putem upravleniya stoimost'yu zhiznennogo cikla produkci / A.M. D'yakov, D.V. Reshetnikov // Fundamental'nye issledovaniya. – 2014. №8(7) – S. 1528 – 1532.

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

Братан Сергей Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053 г. Севастополь, ул. Университетская, 33, serg.bratan@gmail.com

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

V.M. Lipka, S.M. Bratan, Yu.L. Rapatskiy

The process of external thread grinding on thread-rolling rollers is investigated. Grinding with a single-thread wheel allows to obtain the most accurate external thread, but improving the performance of the process, ensuring the quality, stability of the profile and pitch, preventing burns and other defects remains an urgent problem. The results of experimental research the rational choice of parameters of resubstitute, including the depth of cut. The proposed option can significantly improve the performance of the thread grinding process, without losing the quality of the threaded surface.

Key words: thread grinding, thread rolling rollers, abrasive wheel wear.

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

Sergey Bratan, Professor, Doctor of Technical Sciences, Chief of chair of Technology of mechanical engineering, Polytechnic Institute, Sevastopol State University, e-mail: serg.bratan@gmail.com

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

УПРАВЛЕНИЕ АНТРОПОМОРФНЫМ РОБОТОМ МЕТОДОМ КОНЕЧНОГО СОСТОЯНИЯ

Шушляпин Е.А.¹, Безуглая А.Е.²

Аннотация. В работе рассматривается задача приведения конечного эффектора антропоморфного робота в заданное положение за заданное время с помощью метода конечного состояния. На основе известной кинематической модели антропоморфного робота, построенной на основе подхода Денавита-Хартенберга, сформулирована динамическая модель, учитывающая динамику приводов сочленений. В качестве объекта использован реальный робот SAR-400, для которого разработан и верифицирован компьютерным моделированием алгоритм метода конечного состояния.

Ключевые слова. Антропоморфный робот, нелинейная система, метод конечного состояния, терминальное управление.

Постановка задачи. Одно из магистральных направлений в развитии современных технологий – широкое применение роботов, в частности, антропоморфных, используемых в качестве манипуляторов. В сочетании с технологиями искусственного интеллекта, указанные роботы позволяют выполнять манипуляторные операции, заменяющие человека в условиях неблагоприятной окружающей среды. Одна из таких задач выполняется нами в рамках федеральной целевой программы (ФЦП) по разработке роботизированного аппарата, предназначенного для подводных исследовательских работ на малых глубинах (до 10 метров). Данные исследования выполняются при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (соглашение № 14.578.21.0264, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57818X0264).

Предварительные исследования [1] производились и проводятся с использованием реального робота SAR-400, являющегося одним из этапных проектов при разработке широко известного отечественного антропоморфного робота FEDOR, предназначенного для последующей эксплуатации на международной космической станции. Робот SAR-400 представляет собой конструкцию, показанную на **Рис.1**.

На **Рис.1** обозначены: 1 – головное устройство; 2 – отсек стереовидеокамер; 3 – поворотный механизм головного устройства; 4 – туловище; 5, 6, 7, 8 – вращательные кинематические пары манипуляторов; 9 – пятипалый захват; 10 – стойка; 11 – роботизированные призматические оси для движения вперед и назад. Каждая рука робота представляет собой многозвенный манипулятор с двенадцатью степенями свободы.

Переходя от относительно сложного SAR-400 к проектируемому подводному роботу (ППР), отметим следующие особенности, которые желательно учесть при разработке алгоритмов управления.

1. ППР – относительно небольшое устройство.

2. Желательно, чтобы в его составе в минимальной степени использовались импортные комплектующие и программное обеспечение (так, для робота FEDOR запрещены указанные поставки из некоторых стран из-за того, что по телевидению были показаны кадры, когда робот стреляет в цель двумя руками из пистолетов, т.е. представляет собой объект военного назначения).
3. ППР предполагается трехпалым, в отличие от пятипалого SAR-400.
4. Манипулятор ППР будет иметь ту же схему, что и SAR-400, за исключением отсутствия призматических осей.
5. Робот SAR-400 управляется посредством протокола TCP/IP с управляющей программой, находящейся на удаленном компьютере, т.е. требует постоянной дуплексной связи компьютера и робота; для подводного робота такой режим возможен только при кабельной связи.
6. Для расширения функциональных возможностей ППР желательно, чтобы он был автономным, т.е. мог осуществлять свои функции при достаточном удалении от судна-носителя; это означает отсутствие кабельной связи с носителем, а также отсутствие необходимости поддерживать постоянную дуплексную связь носителя и робота.

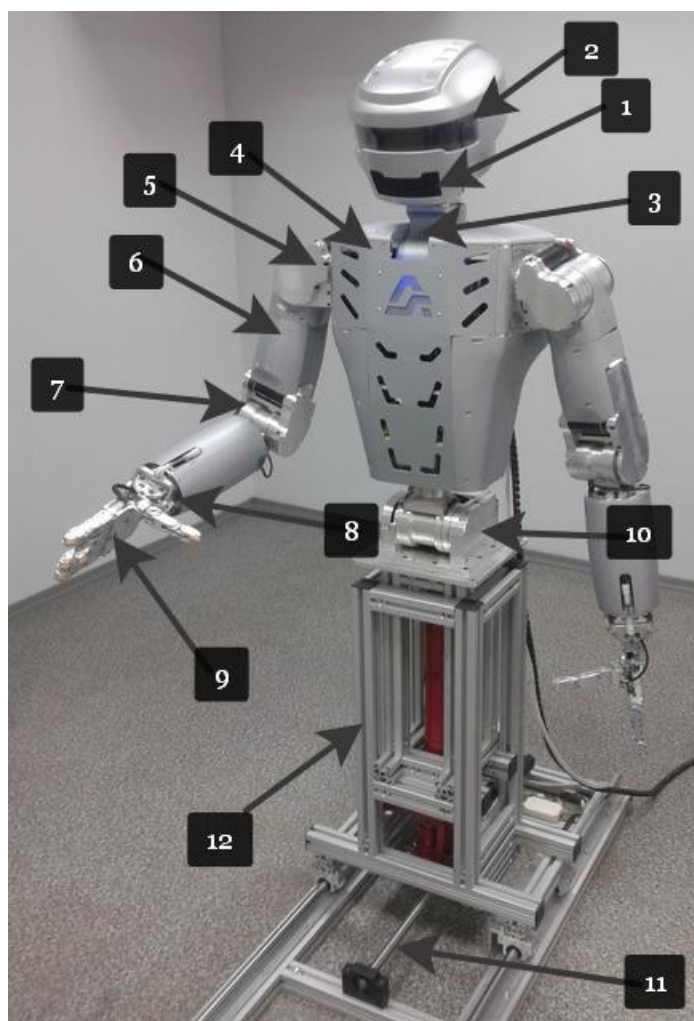


Рис.1. – Робот SAR-400

В настоящей работе решается задача приведения конечного эффектора робота (в данном случае кончика указательного пальца его левой руки) в заданную точку за заданное время с помощью метода конечного состояния [2]. С помощью предлагаемого алгоритма можно подвести эффектор в заданную точку, а затем уже решать задачу захвата предмета (например, археологического артефакта). При этом предполагается использование стереовидеокамеры с функциями распознавания, а также датчиков состояния робота и расстояния до выбранного предмета (расстояния предполагаются небольшими, порядка нескольких метров).

Математическая модель антропоморфного робота основана на использовании подхода Денавита-Хартенберга (DH) [3 – 105], согласно которому для каждого i –го сочленения используется матрица преобразования:

$$A_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & r_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & r_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{xi} & o_{xi} & a_{xi} & p_{xi} \\ n_{yi} & o_{yi} & a_{yi} & p_{yi} \\ n_{zi} & o_{zi} & a_{zi} & p_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где C , S являются сокращенными обозначениями косинуса и синуса соответственно; $\theta_i, d_i, r_i, \alpha_i$ – параметры преобразования, определенные ниже. Для конечного эффектора трехкомпонентные векторы $\vec{n}_i, \vec{o}_i, \vec{a}_i, \vec{p}_i$ (с индексом n вместо индекса i) означают: $\vec{n}_n, \vec{o}_n, \vec{a}_n$ – единичные векторы системы координат конечного эффектора; $\vec{p}_n$ – вектор от исходной системы координат до начала системы координат конечного эффектора.

Матрица преобразования строится на основе следующих предположений:

- 1) оси i –го сочленения образуют правую декартову систему координат, где ось z_{i-1} направлена вдоль оси i –го сочленения к плечу манипулятора;
- 2) оси x_{i-1}, y_{i-1} – взаимно перпендикулярные; для x_0, y_0 – ориентация произвольная, для последующих сочленений – определяются по (1) параметрами преобразования $\theta_i, d_i, r_i, \alpha_i$, имеющими смысл:
 θ_i – угол поворота оси x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} такой, чтобы она стала сонаправленной с осью x_i ;
 d_i – расстояние от начала $(i-1)$ -й системы координат до пересечения оси z_{i-1} с осью x_i и началом i –й системы координат, отсчитываемой вдоль оси z_{i-1} ;
 r_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом i –й системы координат, отсчитываемой вдоль осей x_i ;
 α_i – угол поворота оси z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала сонаправленной с осью z_i .

Исходно задачу управления можно сформулировать как задачу приведения робота из состояния p_0 в заданное состояние p_n . Постановка задачи при этом имеет вид системы нелинейных уравнений:

$$\prod_{i=0}^n A_i(\theta_i) = T(\vec{n}_n, \vec{o}_n, \vec{a}_n, \vec{p}_n), \quad (2)$$

$$\text{где } T(\vec{n}_n, \vec{o}_n, \vec{a}_n, \vec{p}_n) = \begin{pmatrix} n_{xn} & o_{xn} & a_{xn} & p_{xn} \\ n_{yn} & o_{yn} & a_{yn} & p_{yn} \\ n_{zn} & o_{zn} & a_{zn} & p_{zn} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \text{заданная функция конечного}$$

состояния.

Система (2) является нелинейной относительно параметров θ_i , число которых равно числу звеньев (число звеньев левой руки робота SAR-400 равно семи: $\theta_1 \in [-70^\circ, +25^\circ]$, $\theta_2 \in [0^\circ, +80^\circ]$ – плечо (поворот и подъем); $\theta_3 \in [-30^\circ, +45^\circ]$ – поворот предплечья; $\theta_4 \in [-90^\circ, +0^\circ]$ – сгибание локтя; $\theta_5 \in [-70^\circ, +70^\circ]$ – поворот предплечья; $\theta_6 \in [-20^\circ, +20^\circ]$ – поворот указательного пальца; $\theta_7 \in [-15^\circ, +15^\circ]$ – изгиб запястья).

Для решения нелинейной системы (2), а, следовательно, и задачи приведения эффектора в заданное положение, традиционно используются методы математического программирования. Например, в [1] использовано расширение Robotics System Toolbox пакета Matlab (реализовано в версии Matlab 2018 года) и метод Бroyдена-Флетчера-Голдфарба-Шенно (BFGS). При использовании более старых версий Matlab можно для этих же целей использовать функцию lsqnonlin.

Однако традиционный подход имеет некоторые недостатки. Во-первых, он неприменим к случаю использования динамических моделей антропоморфных роботов, учитывающих инерционность приводов сочленений. Во-вторых, традиционный подход не использует обратных связей о текущих значениях углов θ_i , в силу чего точность приведения эффектора робота в заданное положение сильно зависят от точности воспроизводства рассчитанных значений углов θ_i (во всяком случае, такая точность должна быть достаточно высокой). И, наконец, в-третьих, для реализации традиционного подхода для коммерческих антропоморфных роботов нужны лицензионные версии Matlab (или других систем с программным обеспечением для решения задач математического программирования).

По этим причинам мы предлагаем альтернативный подход к определению углов θ_i , разработанный для динамической модели антропоморфного робота – метод конечного состояния [2].

Для применения метода конечного состояния прежде всего сформулируем терминальный квадратичный критерий, отображающий подход эффектора к некоторому заданному моменту t_f к заданному положению.

Определим вначале матрицу:

$$\Delta(t_f) = \prod_{i=1}^n A_i(\theta_i(t_f)) - T(\vec{n}_n, \vec{o}_n, \vec{a}_n, \vec{p}_n) \quad (3)$$

размерностью (4×4) , являющейся по смыслу конечной ошибкой эффектора.

Определим также вектор-столбец δ в виде:

$$\delta = [\Delta_{11}, \Delta_{12}, \Delta_{13}, \Delta_{14}, \Delta_{21}, \Delta_{22}, \Delta_{23}, \Delta_{24}, \Delta_{31}, \Delta_{32}, \Delta_{33}, \Delta_{34}, \Delta_{41}, \Delta_{42}, \Delta_{43}, \Delta_{44}]^T \quad (4)$$

Тогда искомый квадратичный критерий будет иметь вид:

$$J = \delta(t_f)^T \delta(t_f) = \sum_{j=1}^{16} \delta_j^2(t_f) \rightarrow J, \quad (5)$$

где J – желаемое значение критерия. При точном приведении робота к $T(\vec{n}_n, \vec{o}_n, \vec{a}_n, \vec{p}_n)$ значение J равно нулю.

Для решения задачи управления предлагаемым методом сформируем динамическую модель робота в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_i(t)}{dt} &= u_i, i = 1, \dots, 7, \\ t &\in [t_0, t_f], \theta_i(t_0) = \theta_i^0. \end{aligned} \quad (6)$$

Начальные условия θ_i^0 соответствуют начальному положению робота.

В критерии (3, 5) необходимо также задать матрицу $T(\vec{n}_n, \vec{o}_n, \vec{a}_n, \vec{p}_n)$, которую назовем следующей (в последней колонке элементы вектора p заданы в метрах):

$$T(\vec{n}_n, \vec{o}_n, \vec{a}_n, \vec{p}_n) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -0,21 \\ 1 & 0 & 0 & 0,52 \\ 0 & 0 & -1 & 0,53 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Сформированная задача управления (5 – 7) удобна для применения, описанного ниже метода конечного состояния, но в ней пока не учтена динамика приводов сочленений. Для учета указанной динамики воспользуемся приемом, использованным нами ранее [5].

Учет динамики приводов сочленений. Получим управление при учете динамики приводов сочленений, когда вместо (6) в модели используются уравнения динамики приводов в виде инерционных звеньев первого порядка:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = -\frac{1}{T_i} \theta_i + \frac{k_i}{T_i} v_i \quad (8)$$

с коэффициентами k_i , постоянными времени T_i ($i = 1, \dots, 7$) и управляющим воздействием v_i .

Приравняем правые части (8) управлению u , рассчитываемому для модели (6). В результате получим:

$$-\frac{1}{T_i} \theta_i + \frac{k_i}{T_i} v_i = u_i,$$

откуда следует:

$$v_i = \frac{1}{k_i} \theta_i + \frac{T_i}{k_i} u_i. \quad (9)$$

Управления (9), где вместо u_i подставляются выражения, полученные для случая модели (6), реализуют случай модели (8).

Основные расчетные соотношения метода конечного состояния. Метод конечного состояния [2] разработан для решения задач терминального управления нелинейными аффинными системами с гладкими функциями в критерии и динамических ограничениях разного рода (дифференциальных, дифференциальных с запаздываниями, конечно-разностных и др.). Для рассматриваемой задачи постановка задачи управления имеет вид:

$$\begin{aligned} J &= J(z(t_f)) \rightarrow J, \\ \frac{dz(t)}{dt} &= \Phi(t, z(t)) + B(t, z(t)) \cdot u(t), \\ t &\in [t_0, t_f], z(t_0) = z^0, \end{aligned} \quad (10)$$

где z – вектор состояния; $J(z(t_f))$ – непрерывная и дифференцируемая целевая функция терминального критерия с заданным значением J ; Φ и B – в общем случае нелинейные функции времени t и текущего состояния $z(t)$; z^0 – заданное начальное состояние. При этом Φ – дифференцируемая функция.

Управление в данном методе (МКС-управление) рассчитывается по выражениям:

$$\begin{aligned} u(t, z(t)) &= G^+ \cdot f_J, \\ G^+ &= G^T (GG^T)^{-1}, \\ G &= \frac{\partial J(z)}{\partial z} \Big|_{z=\bar{z}(t_f, t, z(t))} \cdot W(t_f, t, z(t)) B(t, z(t)), \end{aligned} \quad (11)$$

где $f_J = \left(J - J(\bar{z}(t_f, t, z(t))) \right) / T_u$ – правая часть дифференциального уравнения $\frac{dJ}{dt} = \frac{J - J}{T_u}$, которое задает экспоненциальное с постоянной времени T_u приближение критериальной функции времени t $J(\bar{z}(t_f, t, z(t)))$ к желаемому значению J , что имеет место при достаточно малом $T_u \ll t_f$. При переменном во времени $T_u = t_f - t$ форма линии, по которой критериальная функция «приближается» к J , уже не экспонента, а прямая.

В выражениях (11) используются переменные конечного состояния (ПКС) $\bar{z}$ и нелинейная переходная матрица (ПМ) В.М.Алексеева [4], определяемая совместной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{z}(\vartheta, t, z(t))}{d\vartheta} &= \Phi(\vartheta, \bar{z}), \\ \frac{dW(\vartheta, t, z(t))}{d\vartheta} &= \frac{\partial \Phi(\vartheta, z)}{\partial z} \Big|_{z=\bar{z}(\vartheta, t, z(t))} \cdot W, \\ \vartheta \in [t, t_f], \bar{z}(t, t, z(t)) &= z(t), W(t, t, z(t)) = I,\end{aligned}\quad (12)$$

где I – единичная матрица.

Заметим, что ПКС и ПМ в (11) нужны как функции второго аргумента t , а по (12) они определяются как функции первого аргумента ϑ для каждого из значений t . По этой причине в общем случае для расчета МКС-управления в каждый момент времени t необходимо интегрировать систему (12) на скользящем интервале $\vartheta \in [t, t_f]$.

Применение МКС для управления роботом. Как следует из постановки задачи (5, 6), здесь вектор состояния $z \equiv \theta$, матрица $\Phi=0$, а матрица B – единичная. По этой причине имеем следующие выражения для составляющих управления u :

$$\begin{aligned}\bar{z}(\vartheta, t, z(t)) &= z(t) \equiv \theta(t), W(\vartheta, t, z(t)) = I \forall t \in [t, t_f], \\ G &= \frac{\partial \sum_{j=1}^{16} \delta_j^2(t)}{\partial z} \Big|_{z=z(t)} \cdot I \cdot I \equiv \frac{\partial \sum_{j=1}^{16} \delta_j^2(t)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta(t)} = 2 \sum_{j=1}^{16} \delta_j(t) \frac{\partial \delta_j(t)}{\partial \theta}.\end{aligned}\quad (13)$$

При получении выражения для матрицы G размерности (7×1) учтено, что матрицы W и B – единичные (обозначены I), вектор переменных конечного состояния $\bar{z}$ равен текущим значениям вектора состояния, в данном случае $\theta(t)$, из-за $\Phi = 0$.

Таким образом

$$G_i = 2 \sum_{j=1}^{16} \delta_j(t) \frac{\partial \delta_j(t)}{\partial \theta_i}, i = 1, \dots, 7. \quad (14)$$

Определим составляющие выражения (14).

Для определения $\frac{\partial \delta_j(t)}{\partial \theta}$ воспользуемся (4) и (5), определив соотношение между индексом j и индексами ошибки Δ_{ks} , которое имеет вид:

$$j = 4(k - 1) + s.$$

Из (5) следует:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Delta(t)}{\partial \theta_i} &= \frac{\partial}{\partial \theta_i} \left(\prod_{l=1}^n A_l(\theta_l(t)) \right) = \\ &A_1(\theta_1) \times \dots \times A_{i-1}(\theta_{i-1}) \times \frac{\partial A_i(\theta_i)}{\partial \theta_i} \times A_{i+1}(\theta_{i+1}) \times \dots \times A_7(\theta_7).\end{aligned}$$

В итоге получаем: $\frac{\partial \delta_i}{\partial \theta_j} = \frac{\partial \Delta_{ij}}{\partial \theta_j}$.

Результаты моделирования и выводы. Для реализации управления (11 – 14) разработана Matlab-программа, по итогам применения которой можно сделать следующие выводы.

Управление (11 – 14) позволяет успешно решать задачу приведения конечного эффектора робота в заданное положение (7). Точность приведения при этом зависит от заданной матрицы $T(\vec{n}_n, \vec{o}_n, \vec{a}_n, \vec{p}_n)$, времени t_f , параметра T_u , заданной точности вычислений, начальных условий. Так, для матрицы (7) при $t_f = 1c$, $T_u = 0,01c$, относительной точности вычислений посредством Matlab-функции ode45 0,001, начальных условиях $\theta = (-45 \ 40 \ 10 \ -45 \ 0 \ 0 \ 0)$, получены следующие фактические значения углов θ и матрицы $\prod_{i=0}^n A_i(\theta_i)$:

$$\theta = (-47.6427 \ 40.7132 \ 12.0285 \ -44.8574 \ 1.4851 \ 0.7467 \ -1.4222),$$

$$\prod_{i=0}^n A_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} -0,0018 & 1,0000 & -0,0091 & -0,2163 \\ 1,0000 & 0,0018 & -0,0042 & 0,5268 \\ -0,0042 & -0,0091 & -0,9999 & 0,5373 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Сравнивая полученную матрицу $\prod_{i=0}^n A_i(\theta_i)$ с целевой матрицей (7), видим, что погрешности достижения координат по осям x, y, z равны соответственно 0,0063, 0,0068, 0,0073 метра, т.е. до одного сантиметра. Погрешности конечной ориентации эффектора также очень малы.

Поскольку метод конечного состояния не учитывает возможные ограничения на переменные состояния (в данном случае углы θ_i), необходимо выбирать начальное состояние робота таким, чтобы начальные значения указанных углов были внутри заданных диапазонов; при моделировании начальные значения полагались примерно равными центрам диапазонов; реально это означает, что перед применением МКС-управления необходима начальная парковка робота.

Библиографический список

1. Kabanov, A.A. The modeling of an anthropomorphic robot arm / A.A. Kabanov, A.N. Balabanov // MATEC Web of Conferences 224, Vol. 224, 2018 (Proceedings of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018, doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822404024>
2. Шушляпин, Е.А. Управление нелинейными системами на основе прогноза конечного состояния неуправляемого движения / Е.А. Шушляпин // Севастополь: СевНТУ, 2012. 282с. ISBN 978-617-612-048-3. Shushlyapin E.A. Upravlenie nelinejnymi sistemami na osnove prognoza konechnogo sostoyaniya neupravlyaemogo dvizheniya. [Control of nonlinear

systems based on the forecast end-state unmanaged traffic]. Sevastopol: SevNTU, 2012. 282p. ISBN 978–617–612–048–3. (In Russ.).

3. Denavit, J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, / J. Denavit, R.S. Hartenberg // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 23, 215 – 221.

4. Алексеев, В.М. Об одной оценке возмущений обыкновенных дифференциальных уравнений / В.М. Алексеев // Вестн. Москов. ун-та. Сер.1. Математика, механика. 1961. №2. С.28 – 36.

5. Шушляпин, Е.А. Нелинейные регуляторы для удержания судна на заданной траектории при «сильных» маневрах / Е.А. Шушляпин и др. // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 53. С. 178-200.

6. Shushlyapin, E.A. Nelinejnye regulatory dlia uderzhania sudna na zadannoj traektorii pri “silnikh” manevrakh [Nonlinear Regulators for Deduction of the Vessel on the Set Trajectory at "Strong" Maneuvers] / E.A. Shushlyapin, V.A. Karapetian, A.E. Bezuglaja, A.A. Afonina // Proceeding of SPIIRAS. 2017. St. Pb: SPIIRAS, Issue. 53. – pp. 178-200. (In Russ).

Bibliograficheskij spisok.

1.1. Kabanov, A.A. The modeling of an anthropomorphic robot arm / A.A. Kabanov, A.N. Balabanov // MATEC Web of Conferences 224, Vol. 224, 2018 (Proceedings of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018, doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822404024>

2. SHushlyapin, E.A. Upravlenie nelinejnymi sistemami na osnove prognoza konechnogo sostoyaniya neupravlyaemogo dvizheniya / E.A. SHushlyapin // Sevastopol': SevNTU, 2012. 282s. ISBN 978–617–612–048–3.

Shushlyapin E.A. Upravlenie nelinejnymi sistemami na osnove prognoza konechnogo sostoyaniya neupravlyaemogo dvizheniya. [Control of nonlinear systems based on the forecast end-state unmanaged traffic]. Sevastopol: SevNTU, 2012. 282p. ISBN 978–617–612–048–3. (In Russ.).

3. Denavit, J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, / J. Denavit, R.S. Hartenberg // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 23, 215 – 221.

4. Alekseev, V.M. Ob odnoj ocenke vozmushchenij obyknovennyh differencial'nyh uravnenij / V.M. Alekseev // Vestn. Moskov. un-ta. Ser.1. Matematika, mekhanika. 1961. №2. S.28 – 36.

5. SHushlyapin, E.A. Nelinejnye regulatory dlya uderzhaniya sudna na zadannoj traektorii pri «sil'nyh» manevrah / E.A. SHushlyapin i dr. // Trudy SPIIRAN. 2017. Vyp. 53. С. 178-200.

6. Shushlyapin, E.A. Nelinejnye regulatory dlia uderzhania sudna na zadannoj traektorii pri “silnikh” manevrakh [Nonlinear Regulators for Deduction of the Vessel on the Set Trajectory at "Strong" Maneuvers] / E.A. Shushlyapin, V.A. Karapetian, A.E. Bezuglaja, A.A. Afonina // Proceeding of SPIIRAS. 2017. St. Pb: SPIIRAS, Issue. 53. – pp. 178-200. (In Russ).

Шушляпин Евгений Андреевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информатика и управление в технических системах», 6u6@bk.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

Безуглая Анна Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы», anna_bezuglaya@list.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

CONTROL OF ANTHROPOMORPHIC ROBOT USING TERMINAL STATE METHOD

E.A. Shushlyapin, A.E. Bezuglaya

The paper deals with the problem of bringing the final effector of an anthropomorphic robot to a given position in a given time using the terminal state method. On the basis of the known kinematic model of anthropomorphic robot, built on the basis of the Denavit-Hartenberg approach, a dynamic model is formulated that takes into account the dynamics of joint drives. The object used is a real robot SAR-400, for which the algorithm of the terminal state method is developed and verified by computer simulation.

Keywords: anthropomorphic robot; nonlinear system; terminal state method; terminal control.

Shushlyapin Evgeny A., doctor of technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Informatics and control in technical systems, 6u6@bk.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Bezuglaya Anna E., candidate of technical Sciences, associate Professor of Information systems, anna_bezuglaya@list.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

УДК 621.317.75

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТА «РАСТЕКАНИЯ СПЕКТРА»

Попов Н.М.¹, Серов А.Н.²

Аннотация. Данная статья посвящена рассмотрению различных методов снижения эффекта «растекания спектра» применительно к средствам измерения показателей качества электроэнергии (СИ ПКЭ). В нормативных документах ГОСТ Р 54130-2010 и ГОСТ 33073-2014 приводятся определения качества электроэнергии и критерии оценки качества электроэнергии. Методы, рассмотренные в статье, предлагается использовать для разработки эталонного устройства для поверки СИ ПКЭ класса А, удовлетворяющим вышеуказанным ГОСТам.

Ключевые слова. Дискретное и быстрое преобразование Фурье, амплитудный и фазовый спектр, эффект «растекания спектра»

Введение. Измерение параметров спектра является одной из основных задач приборов определения показателей качества электрической энергии и спектроанализаторов. Большая часть параметров, регламентируемых ГОСТ, может быть получена путем измерения спектра напряжения и частоты сигнала. Большинство существующих приборов СИ ПКЭ не полностью удовлетворяют требованиям ИЕС 61000-4-30-2017 в качестве средства измерения и как эталонное устройство для поверки СИ ПКЭ класса А.

Наиболее популярным методом измерения спектра является быстрое преобразование Фурье. Методическая погрешность данного метода обусловлена эффектом «растекания спектра» [1]-[3]. В работе подробно разбирается причина возникновения эффекта «растекания спектра» и способы борьбы с данным эффектом.

Измерение спектра с помощью ДПФ. В цифровых измерительных системах для измерения спектра входного сигнала находит применение дискретный аналог преобразования Фурье – дискретное преобразование Фурье:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi j}{N} kn}, \quad (1)$$

где N – число отсчетов сигнала за рассматриваемое время измерения; x_n – отсчеты входного дискретного сигнала; j – мнимая единица.

При использовании ДПФ предполагается, что последовательность отсчетов сигнала является периодически продолженной вперед и назад во времени. При этом, если значения начальных и конечных отсчетов сигнала

сильно различаются, то при периодическом повторении на стыках сегментов возникают скачки, из-за которых искажаются амплитудные значения реально существующих спектральных составляющих и появляются мнимые составляющие. В общем случае, если брать целое число периодов сигнала, чтобы избежать скачков, этот эффект обусловлен изменяющейся частотой сигнала при фиксированной частоте дискретизации. При несоблюдении условий кратности возникает так называемый эффект «растекания спектра».

Выбор частоты дискретизации тоже может повлиять на результат применения ДПФ. Причиной является распределение спектральной мощности сигнала между соседними спектральными отсчетами, так как частота сигнала и частота дискретизации не соотносятся друг с другом в целое число раз. Существуют также алгоритмы, которые борются с данным эффектом, группируя соседние отсчеты.

На практике чаще применяют модификации ДПФ – быстрое преобразование Фурье (БПФ) или алгоритм Герцеля, которые при соблюдении некоторых условий могут вычислить необходимые гармоники спектра быстрее, чем путем прямой реализации ДПФ [3].

Методы снижения погрешности измерения спектра. Для уменьшения погрешности применяются аппаратные и программные методы уменьшения влияния «растекания спектра». Аппаратные методы, как правило, используют генераторы с фазовой автоподстройкой частоты или ФАПЧ [4]. Алгоритмические методы варьируют частоту дискретизации либо количество отсчетов [5].

Практически все алгоритмические методы сводятся к следующим операциям:

- 1) Измерение частоты входного сигнала;
- 2) Подстройка
 - 2.1) Либо частоты дискретизации (должна быть кратна истинному значению частоты входного сигнала) [1], [2], [5];
 - 2.2) Либо числа отсчетов за время измерения (время измерения должно быть кратно истинному значению периода сигнала).

В литературе можно найти множество способов коррекции спектра с помощью окон. Данный метод позволяет снизить либо погрешность определения основной спектральной составляющей, либо погрешности измерения гармоник. При этом при применении окон следует учитывать следующие особенности:

- 1) Имеют место побочные эффекты, связанные с искажением спектра;
- 2) Необходимо выбирать вид и параметры окна для получения требуемой точности. Операция также зависит от вида входного сигнала.

По этим причинам применение окон в измерительной технике ограничено, а в СИ ПКЭ практически невозможно.

Имитационное моделирование метода подстройки отсчетов. Рассмотрим метод подстройки отсчетов. Пусть T – период измеряемого сигнала, T_a – это полное время сигнала, а m – это некоторое целое число.

Тогда справедливо $T_a = Tm = N/f_s$, где N – это количество отсчетов за время измерения; f_s – частота дискретизации.

Если измерить T , то можно будет отбросить отсчеты, которые вносят искажение в спектр. Тогда количество отсчетов будет равно:

$$N = \text{round}(T_a f_s). \quad (2)$$

Формула (3) позволяет рассчитать погрешность метода для основной гармонической составляющей [5]:

$$\delta_m(|U_k|) = -\left(\frac{(\pi m \delta_f)^2}{6} + \left|\frac{\delta_f}{2}\right|\right), \quad (3)$$

где δ_f – относительное отклонение частоты входного сигнала от номинального значения; m – целое число периодов исследуемого сигнала в реализации.

В формуле (3) имеют место две составляющие, имеющие линейную и нелинейную зависимость погрешности измерения амплитудного спектра от относительного отклонения частоты. Линейная составляющая погрешности поддается коррекции – необходимо выполнить подстройку начальной фазы в соответствии с условием [5]:

$$\varphi_U = -0,25\pi \pm 0,5\pi l, l - \text{целое}. \quad (4)$$

Произведем имитационное моделирование в программном пакете Matlab со следующими параметрами: частота дискретизации – 20480 Гц, измерение 10 периодов, коэффициенты гармоник в соответствии с ГОСТ Р 54149-2010. Относительная девиация частоты принята равной 1 %. На **Рис.1** представлены результаты моделирования метода подстройки отсчетов. Так как коэффициенты некоторых гармоник равны нулю, то оценка относительной погрешности для них невозможна.

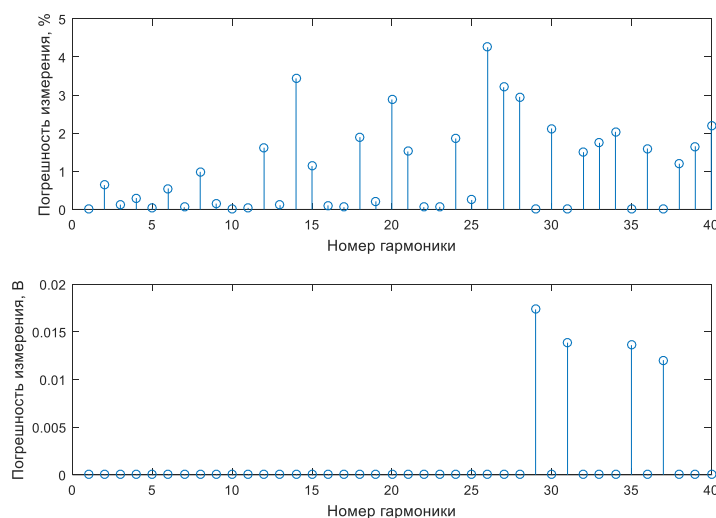


Рис.1 – Результат моделирования определения погрешности метода подстройки числа отсчетов

Имитационное моделирование преобразования частоты дискретизации. Передискретизацией называют изменение частоты дискретизации цифрового сигнала. Отсчеты, соответствующие новой частоте дискретизации, вычисляются по имеющимся отсчетам.

Произведем имитационное моделирование со следующими параметрами: частота дискретизации – 20480 Гц, измерение 10 периодов, коэффициенты гармоник в соответствии с ГОСТ Р 54149-2010. Девиация частоты принята равной 1%. Результаты моделирования показаны на **Рис.2**.

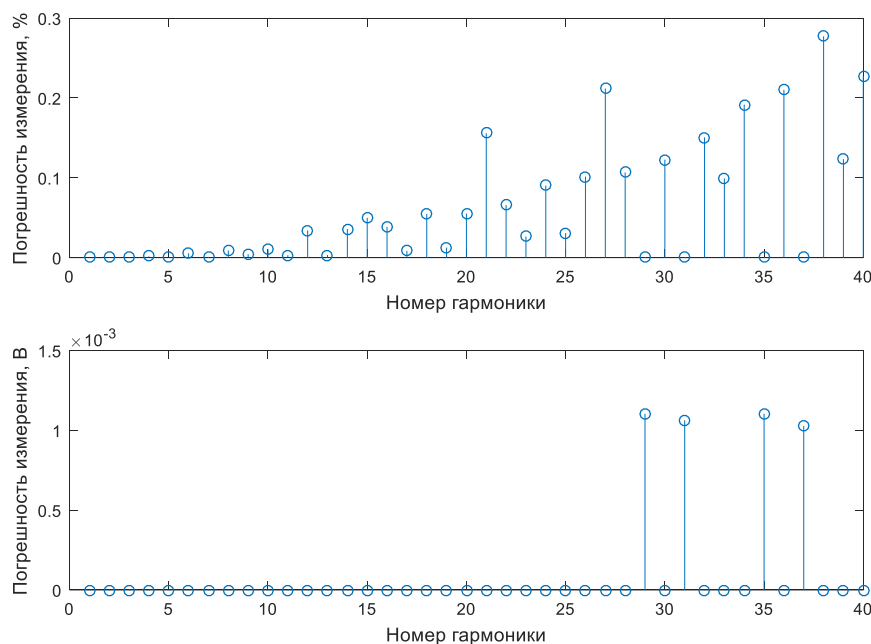


Рис.2 – Результат моделирования определения погрешности измерения гармоник спектра после ПЧД с исходной частотой дискретизации 20480 Гц

Передискретизация производилась с помощью структуры Фарроу с использованием полинома Лагранджа 3-го порядка. Основными источниками погрешности ПЧД являются неидеальность АЧХ и ФЧХ. Приближения абсолютных погрешностей АЧХ и ФЧХ интерполяторов Лагранджа 3-го порядка приведены в таблице 1. Абсолютная погрешность p -го отсчета на выходе интерполятора $\Delta y[p]$ равна [5]:

$$\Delta y[p] = \sqrt{\Delta H^2 + \Delta \varphi^2} \cdot \sin \left(\theta + \arctg \left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta H} \right) \right), \quad (5)$$

где $\Delta H = \Delta H(\mu_p, \omega)$; $\Delta \varphi = \Delta \varphi(\mu_p, \omega)$; $\theta = 2\pi f(pT_{s2} - T_{s1} \cdot 3/2)$

Таблица 1 – Приближения абсолютных погрешностей АЧХ и ФЧХ интерполяторов Лагранджа 3-го порядка [5]

ΔH	$\Delta \varphi$
$\frac{\omega^4}{48} \left(5\mu_p^2 - 2\mu_p^4 - \frac{9}{8} \right)$ $\approx \frac{5\omega^4}{48} \left(\mu_p^2 - \frac{1}{4} \right)$	$-\frac{\omega^5}{12} \mu_p \left(\mu_p^2 - \frac{2}{5}\mu_p^4 - \frac{9}{40} \right)$ $\approx -\frac{\omega^5}{12} \mu_p \left(\mu_p^2 - \frac{1}{4} \right)$

В таблице 1 приняты обозначения: $\omega = 2\pi f/f_{s1}$, f_{s1} – изначальная частота дискретизации, μ_p – отклонение отсчета от середины между двумя соседними отсчетами ($-0,5 \leq \mu_p \leq 0,5$).

Получить аналитическое соотношение для оценки погрешности спектра представляется сложной задачей в виду сложной зависимости спектра от погрешности ПЧД [5]. Поэтому предлагается оценивать погрешность измерения спектра с помощью имитационного моделирования.

Выводы. Сравнительный анализ двух методов показал, что преобразование частоты дискретизации эффективнее метода отбрасывания отсчетов. Данный метод позволяет выполнить требования ГОСТ Р 54149-2010 для СИ ПКЭ класса А и для эталонного устройства для поверки СИ ПКЭ. Недостатками данного метода являются сложность по сравнению с методом подстройки числа отсчетов и отсутствие аналитического соотношения, связывающего погрешность ПЧД и погрешность спектра. Можно заключить, что данный метод позволяет решать задачу точного измерения спектра для СИ ПКЭ.

Библиографический список

- 1.Lima, M. A method of Dynamic Resampling for DFT-based harmonic analysis under time-varying frequency conditions / M. Lima, J. de Carvalho, D. Coury, A. Cerqueira, C. Duque //Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, pp. 1–6, 2010.
- 2.Михалин, С.Н. Проблемы цифровой обработки сигналов в системе автоматизированного контроля качества и учета количества электроэнергии (АСКУЭ) / С.Н. Михалин, В.М. Геворкян // Вестник МЭИ, №1, С. 86-92, 2005.
- 3.Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. БХВ-Петербург, ISBN 978-5-9775-0606-9, 2011
- 4.Ferrero, A. High accuracy Fourier analysis based on synchronous sampling techniques / A. Ferrero, R. Ottoboni // IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 41, issue 6, pp. 780–785, 1992.
- 5.Серов А.Н. Разработка и исследование прибора для измерения показателей качества электроэнергии с повышенной точностью, диссертация кандидата технических наук, 2016.

Bibliograficheskiy spisok

- 1.1. Lima, M. A method of Dynamic Resampling for DFT-based harmonic analysis under time-varying frequency conditions / M. Lima, J. de Carvalho, D. Coury, A. Cerqueira, C. Duque // Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, pp. 1–6, 2010.
2. Mihalyn, S.N. Problemy cifrovoj obrabotki signalov v sisteme avtomatizirovannogo kontrolya kachestva i ucheta kolichestva elektroenergii (ASKUE) / S.N. Mihalyn, V.M. Gevorkyan // Vestnik MEI, №1, S. 86-92, 2005.
3. Sergienko A.B. Cifrovaya obrabotka signalov. BHV-Peterburg, ISBN 978-5-9775-0606-9, 2011
4. Ferrero, A. High accuracy Fourier analysis based on synchronous sampling techniques / A. Ferrero, R. Ottoboni // IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 41, issue 6, pp. 780–785, 1992.
5. Serov A.N. Razrabotka i issledovanie pribora dlya izmereniya pokazatelej kachestva elektroenergii s povyshennoj tochnost'yu, dissertaciya kandidata tekhnicheskikh nauk, 2016.

Попов Николай Максимович, магистр, popownm@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Серов Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доц., serov.an.iit@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МЭИ».

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS FOR DECREASING SPECTRUM LEAKAGE

N. M. Popov, A. N. Serov

This article is devoted to the consideration of various methods of reducing the spectrum leakage in relation of measuring power quality indicators. The documents GOST R 54130-2010 and GOST 33073-2014 provide definitions of power quality and criteria for measuring power quality. The methods considered in the article are proposed to be used for the development of a reference instrument for verification of class. A measurement instrument, satisfying the above-mentioned State Standards.

Key words: discrete and fast Fourier transform, amplitude and phase spectrum, spectrum leakage.

Popov Nikolay Maksimovich, master of technical sciences, popownm@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Power Engineering Institute (National Research University),

Serov Andrey Nikolayevich, candidate of technical sciences, docent, serov.an.iit@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Power Engineering Institute (National Research University).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Доронина Е.Б.¹

Аннотация. Рассмотрены проблемы избыточности процессов при эксплуатации сложных информационных и технических систем, а также оптимизации процессов и ресурсов жизненного цикла технических систем. Показаны возможности анализа процессов в рамках скоростного проектирования на основе моделей, построенных в среде AnyLogic. В процессе исследования определены ключевые точки жизненного цикла системы и показано преимущество точечного моделирования как основы организационного управления процессами. На основе предложенных моделей, а также идентификации этапов жизненного цикла получены оценки длительности реализации каждой работы в рамках отдельного этапа жизненного цикла, что позволило формировать эффективные планы обслуживания сложной технической аппаратуры.

Ключевые слова. Информационная система, техническая система, организационное управление, жизненный цикл, моделирование, AnyLogic, поддержка принятия решений, ремонт сложных технических объектов.

При создании и функционировании современных сложных технических систем (СТС) анализ организационных производственных процессов играет важную роль [1]. Процессы обслуживания сложной технической аппаратуры (СТА) связаны с необходимостью учета следующих факторов: неопределенности процессов эксплуатации, при которых возникают отклонения эксплуатационных характеристик СТА (а); неопределенности в планировании профилактических процедур в связи с (а), что обуславливает сложность управления этими процессами (б) и т.п. Существующие подходы решают лишь часть вопросов, связанных с учетом (а) и (б), поскольку предлагают детерминированное планирование или, с учетом стохастических моделей, вероятностные оценки целесообразных времен профилактики и длительности ремонтов СТА [2, 3].

В работе [1] рассматривается подход, позволяющий автоматизировать планирование использования по назначению разрабатываемых перспективных мобильных средств войскового ремонта и технического обслуживания вооружения и военной техники. Эффективность функционирования системы войскового ремонта вооружения и военной техники определяется составом ее элементов на каждом из уровней эшелонирования, а также способом распределением задач между элементами различных уровней. Элементом, наиболее существенно оказывающим влияние на эффективность функционирования системы войскового ремонта в целом, являются средства проведения технического обслуживания и ремонта, а именно комплект унифицированных средств технического обслуживания и войскового ремонта.

Модель профилактики и ремонтов технических средств рассматривает в качестве критериев оптимизации показатель исправности, однако в этом исследовании учитывается только аспект ремонта, тогда как в предложенной работе показатели унифицированы, и могут применяться в различных классах СТС.

Система организационного управления (СОУ) представляет собой управление с произвольным объектом и целью управления, связанной с состоянием данного объекта, имеющим модифицированные связи между неизменными структурными компонентами. Задача по переводу данного составного объекта из одного состояния в другое называется задачей организационного управления, а само управление в данном случае – организационным [3].

Таким образом, моделирование процессов обслуживания СТА, в том числе в рамках СОУ, напрямую связано с повышением эффективности ремонтных предприятий, а также позволяет быстро адаптировать процессы жизненного цикла изделий как под вновь прибывающие требования. Основной задачей в этой связи является совершенствование и модернизация процесса организационного управления обслуживанием и ремонтом СТА и СТС в целом.

Цель исследования: применение и оценка модельно-ориентированного подхода как основы оперативного управления процессами жизненных циклов изделий для повышения эффективности обслуживания (ремонта и профилактики) СТА, в том числе с учетом ГОСТ Р 56407 – 2015 (Бережливое производство).

Пусть $s_i \in S$ – стратегия обслуживания СТА; t_i – время, требуемое на обслуживание СТА, t_k – критическое время обслуживания, $t_0 < t_i < t_k$; e_i – показатель эффективности s_i стратегии; $\{r\}$ – множество ресурсов различных типов на реализацию обслуживания СТА; $\{V\}$ – множество внешних условий, требуемых для обслуживания СТА (например, доставка, особые условия, наличие стендов и т.п.). Множество $\{V\}$ можно представить двумя подмножествами: детерминированные условия $\{d\}$ и стохастические $\{v\}$. Тогда формализованное описание модели обслуживания СТА представляет собой функционал

$$E_i = f(s_i, t_i, \{r\}, \{d\}, \{v\}), s_i \in S, t_0 < t_i < t_k, d \in D, \quad (1)$$

где S – множество всех возможных стратегий обслуживания СТА, D – множество всех заданных детерминированных условий внешней среды.

Для решения оптимизационных задач, в качестве цели следует определять эффективность e^* некоторой стратегии или затраченное время на обслуживание СТА

$$e^* = \arg \max (f, s_i, t_i, \{r\}, \{d\}, \{v\}), \quad (2)$$

$$t^* = \arg \min (f, s_i, e_i, \{r\}, \{d\}, \{v\}). \quad (3)$$

При известных множествах ресурсов $\{r\}$, стратегий s_i не всегда возможно получить единственное значение e^* в связи с неопределенностью $\{v\}$. Таким образом, (2) и (3) не во всех случаях могут иметь единственное решение, либо не иметь решений, например, из-за нарушения условия длительности $t_i > t_k$ или своевременности обслуживания $t_0 > t_i$ (характерно для (2)). Это противоречие нивелируется посредством интерактивной системы поддержки принятия решений в рамках имитационного моделирования агентного типа. Для реализации модели обслуживания по принципу СОУ целесообразно рассмотреть понятие жизненного цикла (ЖЦ) системы обслуживания СТА, **Рис.1.**

В соответствии с ГОСТ 34, процесс – это совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, преобразующей входы в выходы, а риск – следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей. Жизненный цикл (ЖЦ) системы отражает стадии процесса, охватывающие различные состояния системы, начиная с момента возникновения необходимости для такой системы и заканчивая ее полным выводом из эксплуатации; конечный набор общих фаз и этапов, через которые система может проходить в течении ЖЦ.



Рис.1 –Схема процесса обслуживания СТА

С помощью алгоритма создания программ тестирования в среде имитационного моделирования Any Logic построена модель, приведенная на **Рис.2.** Одной из главных идей модели является расщепление процессов на предварительном этапе (до подготовительной работы), что позволяет более подробно рассмотреть особенности ЖЦ СТА. Эта методология соответствует смешанной модели ЖЦ (спирально-последовательной). Соответствия блоков модели и этапов ЖЦ СТА приведены в таблице 1.

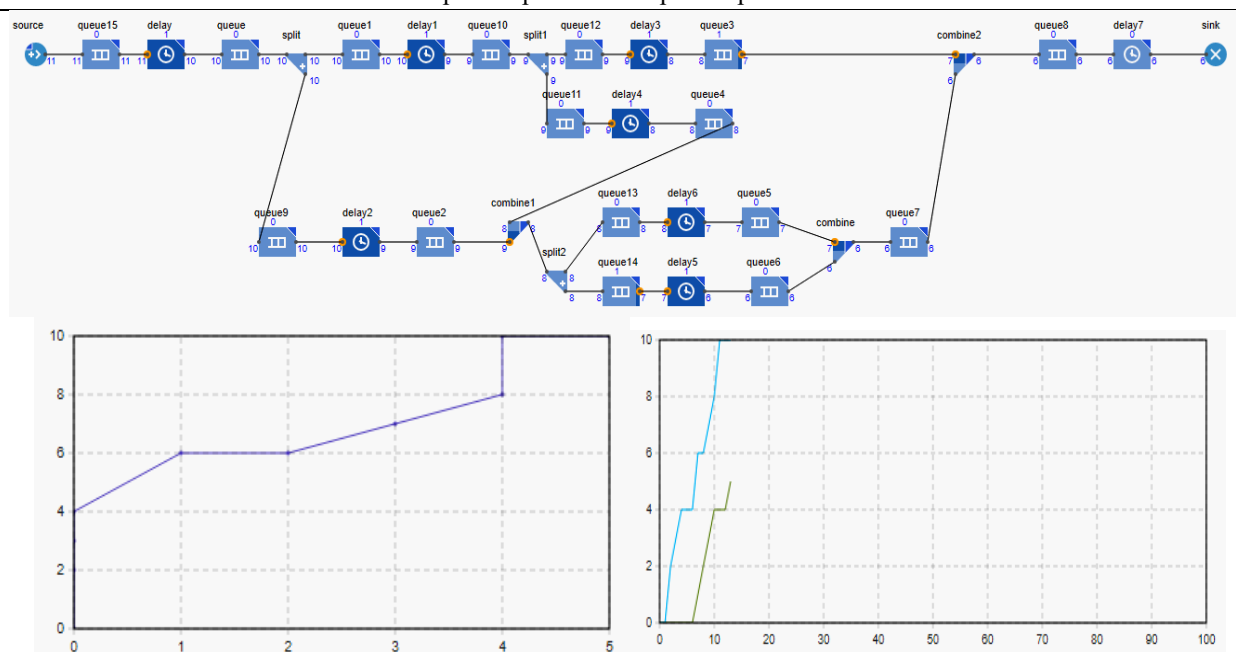


Рис.2 – Схема создания ремонтно-диагностических программ СТА и графики результатов исследования

Таблица 1. – Интерпретация модельных обозначений

Модельное обозначение	Интерпретация
split	Разделение на подготовительную работу и работу на стенде
queue1	Изучение сопроводительной документации
delay1	Определение перечня ТЭЗ (типовых элементов замены) на которые необходимо отработать ПТ (программы тестирования)
queue10	Анализ и формирование перечня ТЭЗ для отработки программ тестирования
queue12	Изучение технической документации на ТЭЗ
delay3	Определение технической возможности программной системы осуществлять диагностику и ремонт каждого ТЭЗ из перечня (количество входов-выходов, предельные значения напряжений, токов, частоты)
queue3	Распределение ТЭЗ по конструктивному исполнению между направлениями (цифровые, аналоговые, СВЧ, вторичные источники питания). Утверждение списка ТЭЗ для разработки на стенде.
queue11	Определение уровня доработок
delay4	Документация, соответствующая уровню уже внесенных доработок
queue4	Принятие решение о внесении доработок
queue9	Изучение технической документации на ТЭЗ. Подготовка библиотеки элементов, используемых в ТЭЗ. Разметка схемной документации на ТЭЗ в ПТ
delay2	Определение способа подключения ТЭЗ к стенду. Отработка схемы жгута (адаптера). Отработка конструкторской документации на жгут
queue2	Сбор и подготовка комплектующих составляющих для изготовления жгута (адаптера)
queue13	Подготовка к изготовлению жгута и анализ полученных результатов

delay6	Изготовление жгута (адаптера)
queue14	Подготовка к созданию алгоритмов проверки, настройки и ремонта ТЭЗ и анализ полученных результатов
delay5	Создание алгоритмов проверки, настройки и ремонта ТЭЗ
queue7	Подключение ТЭЗ к стенду с помощью жгута (адаптера) и отладка алгоритмов проверки, настройки и ремонта ТЭЗ
queue8	Документальное оформление ПТ (Инструкция проверки, схемная документация и т.д). Проверка ее в нормоконтроле. Сдача ПТ заказчику. Утверждение документации. Сдача утвержденной документации в архив.
delay7	Техническое сопровождение ПТ в процессе эксплуатации

На **Рис.3** показаны результаты моделирования процесса обслуживания СТА: получены числовые значения задач на входе модели (т.е. число задач обслуживания СТА) и реализованных задач на выходе модели, представленной на **Рис.2** и таблице 1.



Рис.3 – Сравнение полученных результатов при помощи моделирования и исходных результатов

Дополнительно в модель вносились оперативные требования по обслуживанию СТА: на 5 временном такте (**Рис.3**) заметно расхождение числа задач на выходе (ускорились процессы реализации текущих подзадач); однако через несколько временных промежутков, заметного скачка эффективности работы e^* не наблюдается, в связи с тем, что производительность соответствующих модулей недостаточна. Стратегия s_1 относительно исходной s_0 не дала прирост e^* в связи с недостаточным ресурсным обеспечением $\{r\}$, при этом длительность этапов соблюдена $t_i > t_k$ и своевременность реализации локальной работы получены.

Таким образом, применяя МОП- подход возможно получать оперативную информацию по управлению процессом обслуживания СТА.

На основе предложенной модели в рамках идентификации этапов ЖЦ целесообразно получать оценки длительности реализации каждой работы в рамках отдельного этапа ЖЦ СТА, оптимизировать этап организационного управления производственными процессами. Результаты, предложенные в

исследованиях, позволили получить механизмы, реализующие элементы бережливого производства.

Библиографический список

1.Алексеев, В.В. Модели планирования ремонтов и замен элементов в процессе жизненного цикла сложных технических систем / В.В. Алексеев, И.В. Хоменко, Р.А. Прохорский // Вестник ВИ МВД России. 2011. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-planirovaniya-remontov-i-zamen-elementov-v-protsesse-zhiznennogo-tsikla-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 21.05.2019).

2.Аверченков, В.И. Системы организационного управления: учеб. пособие [электронный ресурс] / В.И. Аверченков, В.В. Ерохин. – М.: Флинта, 2011. – 208с.

3.Боев В.Д. Компьютерное моделирование: Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7. – СПб.: ВАС, 2014. – 432 с.

Bibliograficheskiy spisok.

1.Alekseev, V.V. Modeli planirovaniya remontov i zamen elementov v processe zhiznennogo cikla slozhnyh tekhnicheskikh sistem / V.V. Alekseev, I.V. Homenko, R.A. Prohorskiy // Vestnik VI MVD Rossii. 2011. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-planirovaniya-remontov-i-zamen-elementov-v-protsesse-zhiznennogo-tsikla-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem> (data obrashcheniya: 21.05.2019).

2.Averchenkov, V.I. Sistemy organizacionnogo upravleniya: ucheb. posobie [elektronnyj resurs] / V.I. Averchenkov, V.V. Erohin. – M.: Flinta, 2011. – 208s.

3.Boev V.D. Komp'yuternoe modelirovanie: Posobie dlya prakticheskikh zanyatij, kursovogo i diplomnogo proektirovaniya v AnyLogic7. – SPb.: VAS, 2014. – 432 s.

Доронина Екатерина Борисовна, инженер-конструктор СКБ «Меридиан», ГППП «Гранит» doka0605@yandex.ru, Севастополь, Россия.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MAINTENANCE OF COMPLEX TECHNICAL EQUIPMENT ON THE BASIS OF MODEL-BASED DESIGN

E. B. Doronina

The problems of redundancy of processes in the operation of complex information and technical systems, as well as optimization of processes and resources of the life cycle of complex technical systems are considered. The possibilities of process analysis in the framework of high-speed design based on models built in AnyLogic environment are shown. In the course of the study, the key points of the system life cycle are identified and the advantage of point modeling as the basis of organizational management processes is shown. On the basis of the

proposed models, as well as the identification of the life cycle stages, the estimates of the duration of each work within a separate life cycle stage were obtained, which allowed to form effective plans for the maintenance of complex technical equipment

Key words: information system, technical system, organizational management, life cycle, modeling, AnyLogic, decision support.

Doronina Ekaterina Borisovna, design engineer of Concern VKO Almaz-Antey, GPTP "Granite", SKB "Meridian", doka0605@yandex.ru, Sevastopol, Russia.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИМИТАЦИИ КАЧКИ СУДНА НА ОСНОВЕ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Осадченко А. Е.¹

Аннотация. *Исследуется возможность использования многокоординатной платформы с параллельной кинематической схемой, управляемой шаговыми двигателями для создания автоматизированной системы имитации бортовой и килевой качки судна.*

Ключевые слова. *Имитатор качки, многокоординатная платформа, шаговый двигатель, обратная задача динамики, моделирование.*

Автоматизированная система имитации качки судна разрабатывалась в рамках работы по созданию системы прогнозирования критических ситуаций, таких как переворачивание и опрокидывание судна.

В качестве механической части автоматизированной системы была выбрана подвижная платформа с 6-ю степенями свободы, которая является манипулятором с параллельной кинематической схемой[1]. Манипуляторы имеют хорошую жесткость и робастность[2].

В данной работе исследовалась возможность использования многокоординатной платформы управляемой шаговыми двигателями (ШД) обеспечить необходимые амплитудные значения имитации бортовой и килевой качки.

Использование параллельных подвижных частей, позволяет снизить нагрузку на управляющие приводы, а также улучшить динамику, что имеет большое значение для имитации раскачивания судна при движении в море.

Механическая часть имитатора состоит из двух жестких пластин (**Рис.1**). Одна из пластин, представляет собой неподвижное основание, на котором закреплены 6 двигателей Д1-Д6. Вторая – движущаяся платформа. Платформа соединена с 6 опорными направляющими длиной r посредством шаровых шарниров, закрепленных на окружности R_p , обеспечивающих ее свободное движение во всех направлениях. Другие концы опорных направляющих соединены шаровыми шарнирами с концами 6 рычагов, длиной r , закрепленных на осях двигателей Д1-Д6. Двигатели закреплены на основании таким образом, что оси всех двигателей параллельны основанию. Оси двигателей Д2 и Д3 параллельны друг другу; параллельны также оси пары двигателей Д4, Д5 и пары Д6, Д1. Пары двигателей Д1, Д2 расположены под углом 120 градусов. Такой же угол образуют оси пар двигателей Д3, Д4 и пары Д5, Д6.

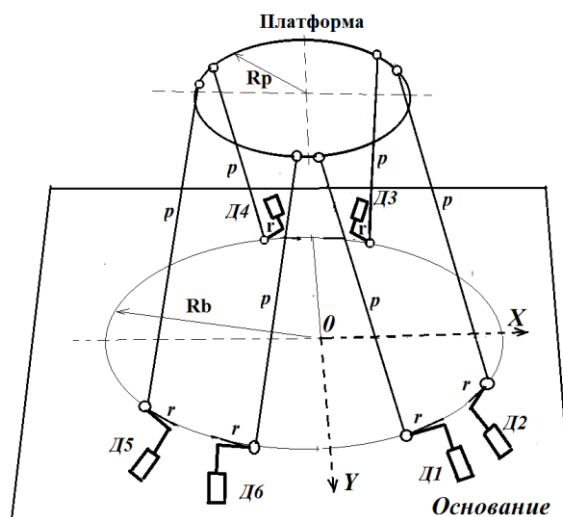


Рис.1 - Схема механической части имитатора

Точки соединения осей всех 6 двигателей с рычагами находятся на окружности с радиусом R_b . Центр этой окружности совпадает с началом координат неподвижной части имитатора, а оси $0X$ и $0Y$ расположены в её плоскости. Ось $0Y$ проходит из начала координат через точку, которая находится на равном расстоянии между точками соединений осей двигателей Д6, Д1 с рычагами.

Система координат, связанная с подвижной платформой, находится в плоскости окружности R_p , центр которой совпадает с началом координат, а ось $0Y'$ проходит через точку находящуюся на равном расстоянии между центрами крепления шарниров к платформе, которые соединены с направляющими от двигателей Д1, Д6.

В исходном состоянии все рычаги на осях двигателей установлены параллельно основанию. Рычаги пар двигателей Д6, Д1 направлены встречно. Также встречно направлены рычаги в парах Д4, Д5 и Д2, Д3.

Углы поворота двигателей для перевода подвижной платформы из исходного состояния в заданное однозначно определяются при помощи решения обратной задачи кинематики, путем решения системы из 6 нелинейных уравнений[3].

Коэффициенты уравнений также зависят от углового положения точек соединения осей двигателей с шарнирами в системе координат $0XY$ и углового положения шарниров подвижной платформы в системе координат $0X'Y'$.

Необходимо отметить, что для некоторых заданных положений, система уравнений может не иметь решения, что означает невозможность их достижения.

Для испытания автоматизированной системы имитации качки построен стенд, общий вид которого, показан на **Рис.2**.

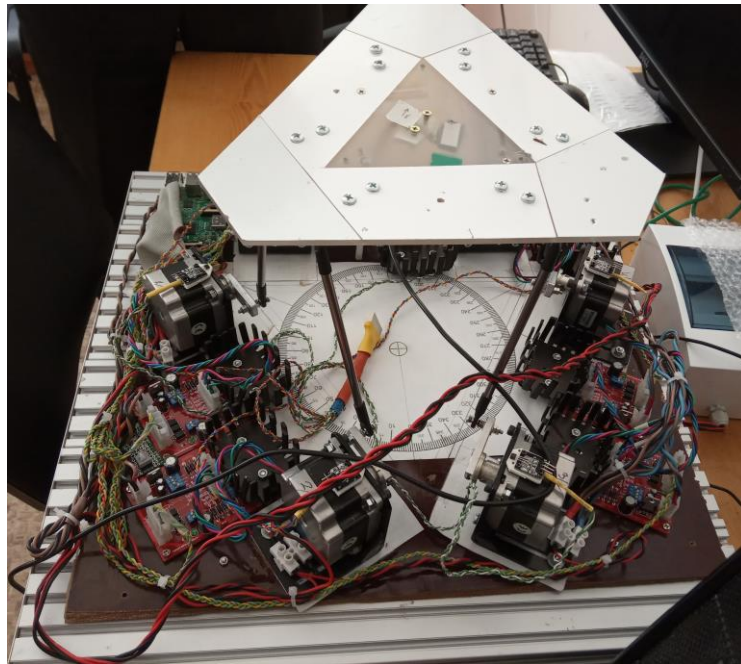


Рис.2 – Испытательный стенд имитатора качки

Параметры механической части стенда приведены в таблице 1.

Таблица 2. – Параметры механической части испытательного стенда

Параметр	Значение	Единица измерения
Длина опорной направляющей	0,157	м
Длина рычага двигателя	0,03	м
Радиус базы	0,135	м
Радиус платформы	0,1	м
Углы расположения точек крепления на базе	-44 44 76 164 -164 -76	град.
Углы расположения точек крепления на платформе	-10 10 110 130 -130 -110	град.

Для управления платформой были использованы гибридные ШД марки SY57STN41-2804A[4], основные характеристики которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики двигателей SY57STN41-2804A

Параметр	Значение	Единица измерения
Номинальное напряжение	2	В
Ток одной фазы	2,8	А
Сопротивление фазы	0,7	Ом
Индуктивность фазы	0,4	мГн
Момент удержания	5,5	кг·см
Момент инерции ротора	120	г·см ²
Масса	0,45	кг

Угол шага таких двигателей составляет 1.8 градуса, погрешность при полном шаге без нагрузки составляет $\pm 5\%$.

В испытательном стенде применены 6 контроллеров типа ТВ6560, предназначенными для управления биполярными ШД, которые допускают максимальный ток ШД - 3,5А и максимальное напряжение питания 40 В[5].

Вычисление необходимого угла поворота ротора ШД и соответственно количества шагов, для обеспечения заданного положения платформы, требует решения обратной задачи кинематики[3] и осуществлялось в графической среде имитационного моделирования Simulink.

Simulink-модель для решения обратной задачи кинематики платформы показана на **Рис.3**.

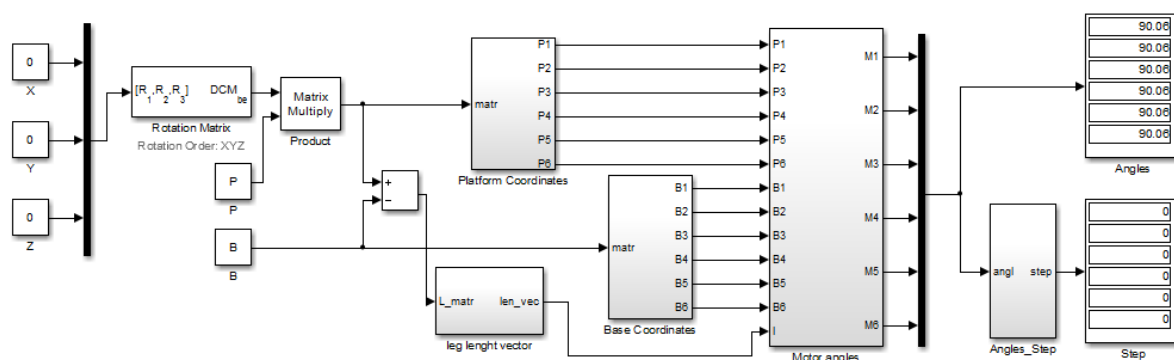


Рис.3 – Simulink-модель испытательного стенда

Simulink-модель испытательного стенда состоит из нескольких подсистем:

- подсистема расчета матрицы вращения – блок «Rotation Matrix»;
- подсистема расчета координат точек крепления опор к платформе – блок «Platform Coordinates»;
- подсистема расчета координат точек крепления опор к базе – блок «Base Coordinates»;
- подсистема расчета расстояния между точками крепления опор на базе и на платформе – блок «Leg length vector»;
- подсистема расчета углов поворота двигателей – блок «Motor Angles»;
- подсистема расчета шагов ШД – блок «Angles_Step».

Результаты моделирования продемонстрировали возможность одновременной имитации бортовой и килевой качки с амплитудой до 12 град.

При имитации только бортовой качки максимальная амплитуда может достигать 18 град. Результаты моделирования количества шагов ШД при различных угловых положениях платформы приведены в таблице 3. Отрицательные значения означают поворот ротора ШД в противоположном направлении.

Исследованная многокоординатная платформа может быть использована для построения автоматизированных систем имитации бортовой и килевой качки. В качестве направления дальнейшего исследования предполагается рассмотрение способов управления ШД имитатора качки при помощи микроконтроллеров.

Исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57817X0259)

Таблица 3. – Результаты моделирования

Угловые положения платформы, град.		Количество шагов ШД					
Х	У	ШД1	ШД2	ШД3	ШД4	ШД5	ШД6
6	0	-7	7	12	6	-6	-14
-6	0	7	-7	-14	-6	6	12
6	6	-22	-4	12	16	5	-16
-6	6	-4	-22	-16	5	16	12
6	-6	4	17	13	-6	-21	-13
-6	-6	17	4	-13	-21	-6	13
0	6	-11	-11	-1	11	11	-1
0	-6	10	10	1	-12	-12	1
9	0	-12	10	18	8	-9	-26

Библиографический список.

1. Stewart D.A. Platform with six degrees of freedom // Proc. Inst. Mech. Engr. – 1965/1966. – Vol.180, Part I, No. 15. – P. 371 – 386.

2. Merlet J.-P. Parallel Robots. – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 372 p.

3. Кабанов А.А. Моделирование подвижной платформы мехатронной системы с шестью степенями свободы / А.А. Кабанов // Материалы III Междунар. научн.-техн. конференции молодых ученых «АМИТ», 15-16 мая 2013 г. – 2013. – С. 96-100.

4. Ресурсы для шагового двигателя SY57STH41-2804A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.micropap.com/pdf/nema23/SY57STH41-2804A.pdf>, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.

5. Ресурсы для микросхемы TB6560A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/548481/TOSHIBA/TB6560AHQ.html>, свободный – Загр. с экрана. Яз.англ.

Bibliograficheskiy spisok.

1. Stewart D.A. Platform with six degrees of freedom // Proc. Inst. Mech. Engr. – 1965/1966. – Vol.180, Part I, No. 15. – P. 371 – 386.

2. Merlet J.-P. Parallel Robots. – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 372 p.

3. Kabanov A.A. Modelirovanie podvizhnoj platformy mekhatronnoj sistemy s shest'yu stepenyami svobody / A.A. Rabanov // Materialy III Mezhdunar. nauchn.-tekhn. konferencii molodyh uchenyh «AMIT», 15-16 maya 2013 g. – 2013. – S. 96-100.

4. Resursy dlya shagovogo dvigatelya SY57STH41-2804A [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.micropap.com/pdf/nema23/SY57STH41-2804A.pdf>, svobodnyj – Zagr. s ekrana. YAz.angl.

5. Resursy dlya mikroskhemy TB6560A [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa:

<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/548481/TOSHIBA/TB6560AHQ.html> , svobodnyj – Zagr. s ekrana. YAz.angl.

Осадченко Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, aeosadchenko@rambler.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

AUTOMATED SYSTEM FOR SIMULATING SHIP'S ROLLS BASED ON A MULTI-AXIS PLATFORM

A. E. Osadchenko

The possibility of using a multi-axis platform with a parallel kinematic scheme controlled by stepper motors to create an automated system for simulating pitching of a ship is being investigated.

Key words: pitching simulator, multi-axis platform, stepping motor, inverse kinematics problem, simulation.

Osadchenko Alexander Evgenevich, candidate of technical sciences, aeosadchenko@rambler.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА

Чупрынин Е.А.¹, Доронина Ю.В.²

***Аннотация.** Рассматривается процесс информационного поиска в сети Интернет на основе функционального моделирования, описываются его характеристики. В контексте данного исследования произведено детальное описание операций, составляющих рассматриваемый процесс, что позволило получить иерархию функциональных моделей, по которым возможно проводить реорганизацию, развитие и управление процессами информационного поиска.*

***Ключевые слова.** Информационный поиск, информационная система, анализ данных, функциональное моделирование, организационные процессы.*

Сложность процессов, лежащих в основе информационного поиска (далее – ИП) для различных целей, обуславливает трудности его формализации. Например, ИП с научными целями анализа наукоемких источников, сопряжен с целым рядом проблем: наличие так называемого информационного мусора (далее – ИМ), особенности реализации сайтов с рекламой и отвлекающими ссылками, особенностей пользователя при работе в сети Интернет (отвлечения внимания, переключение на другие виды поиска).

Исследованию эффективности взаимодействия человека (пользователя) и информационной системы (ПК) – человеко-машинного взаимодействия (далее – ЧМВ) – посвящено немало работ.

Например, в работе профессора Калифорнийского университета Г. Марк демонстрируются последствия переключений (отвлечений) внимания во время рабочего процесса. На основании проведенных наблюдений утверждается, что каждый раз, отвлекаясь на что-либо, человек тратит более 10 минут на то, чтобы снова сконцентрироваться на исходной задаче [1]. Стоит отметить, что результаты исследования актуальны и при рассмотрении процесса ИП.

Также представляют интерес исследования моделей ИП, в рамках которых приводится моделирование средств и объектов процесса поиска (напр. ИМ и его влияния), а также их связи друг с другом [2]. Такие работы позволяют производить анализ ИП в рамках взаимодействий с построенной моделью, конкретизировать полученные параметры, исследовать поведение процесса с помощью симуляции работы модели и т.д.

С учетом анализа существующих исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) процесс ИП стохастический, неоднородный, может быть декомпозирован на ряд подпроцессов;
- 2) области, для которых важен анализ процессов ИП, весьма обширны – от научной работы до процессов организационного управления производствами;

- 3) исследования процессов функционирования автоматизированных производств в настоящее время заключается в построении моделей эффективного управления этими процессами, в том числе в рамках корпоративных информационных систем (PLM, CAD, ERP и т.п.); в таких системах целесообразно иметь рычаги управления поисковыми процедурами.

Например, рассматривая существующую ИС планирования ресурсов ERP (Enterprise Resource Planning) стоит отметить, что несмотря на широкий список представленных модулей (в т.ч. управления человеческими ресурсами, эффективностью), предоставленные пользователям возможности оперируют с традиционными показателями (например, качественная оценка результатов, затраченное время), однако не позволяют рассматривать управление такими процессами в рамках актуального сегодня направления – ИП, при работе на предприятиях замкнутого цикла.

Таким образом, несмотря на существующие разработки в области ИП, некоторые аспекты остаются неразрешенными. В статье рассматривается узкая область функционального моделирования ИП как способа описания процесса поиска.

Целью проводимого исследования является построение комплекса функциональных моделей процесса ИП в сети Интернет с помощью известных методологий моделирования. Результат должен предоставлять исчерпывающую информацию о самом процессе, его структуре и этапах жизненного цикла; позволять определять параметры и осуществлять управление ИП, а также давать возможность саморазвития оператора в рамках ЧМВ.

Функциональный подход в моделировании предполагает рассмотрение поведения системы как набора действий (функций), их оценку, причем под действием понимается свойство, приводящее к достижению цели [3]. Поскольку свойство отображает взаимодействие системы с внешней средой, то свойства могут быть выражены в виде некоторых элементов и подсистем основной системы. В работе будут представлены графические схемы, построенные с помощью различных методологий моделирования. Наиболее часто встречающаяся и используемая для данной цели методология IDEF0 предназначена для разработки функциональных моделей, описывая процессы и отображая существенные для понимания объекты [4]. Применение методологии WFD (Workflow diagram), предназначено для описания рабочих технологических процессов с учетом их ветвления, что не позволяет реализовать нотация IDEF0. Методология BPMN (Business Process Model and Notation) позволяет описывать и визуализировать управляющие процессы, классифицировать их и подразделять на потоки.

Рассматривая процесс ИП предлагается оперировать следующими терминами: поисковая система – ИС, позволяющая осуществлять поиск информации в сети Интернет; оператор – лицо, взаимодействующее с поисковой системой; отвлечение от темы – процесс переключения оператором внимания от глобальной интересующей темы в рамках одного поиска, на другую, после которого он вернется к поиску информации по глобальной теме.

На **Рис.1** приведена контекстная IDEF0 диаграмма процесса ИП в системе управления ресурсами предприятия. Диаграммы такого рода представляют собой самое общее описание системы и ее взаимодействие с внешней средой [5]. Пусть рассматривается рабочий процесс P , требуемые ресурсы r , ограничения системы поиска: t и α , где t – время, α – ограничения производительности, связанные с лимитированным доступом к некоторым источникам, E – эффективность (возможности) поисковой системы, причем

$$E = f(x, t, \{\alpha\}, \{\gamma\}), \alpha \leq \alpha^0, \gamma \leq \gamma^0 \quad (1)$$

где γ – внешние свойства информационных источников, α^0 и γ^0 – начальные моменты свойств.

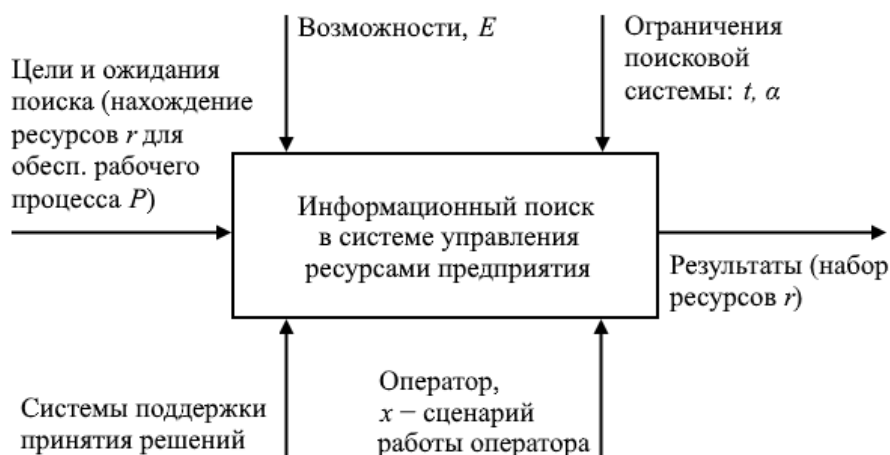


Рис.1 – Контекстная диаграмма информационного поиска

Для более детального описания процесса ИП на **Рис.2** представлены обобщенные схемы действий оператора для информационного поиска в нотации BPMN, с учетом и без учета отвлечений внимания в процессе ИП, которые наблюдаются в реальных сценариях работы. Такой подход представления диаграмм в описании рассматриваемого процесса позволяет сравнить последовательность действий оператора в двух различных поведенческих алгоритмов.

Рассмотрим пример моделирования ИП в рамках управления производственными процессами ресурсоемкого предприятия замкнутого цикла работы. Предположительно, ИП в этом случае подразумевает просмотр различных источников данных, мониторинг ресурсов предприятия, мониторинг информации в сети корпорации и сети Интернет.

Проследим тенденцию изменения количества отвлечений внимания оператором от основной темы в информационном поиске. Отметим, что статистические данные представляют собой сведения о процессе информационного поиска 10-ти пользователей, работа которых связана с периодической необходимостью поиска информации в корпоративной сети, обеспечивающей доступ в Интернет. Распределение количества моментов

отвлечений внимания (далее – КМОВ) по часам в рамках рабочего дня приведено в **Таблице 1**.

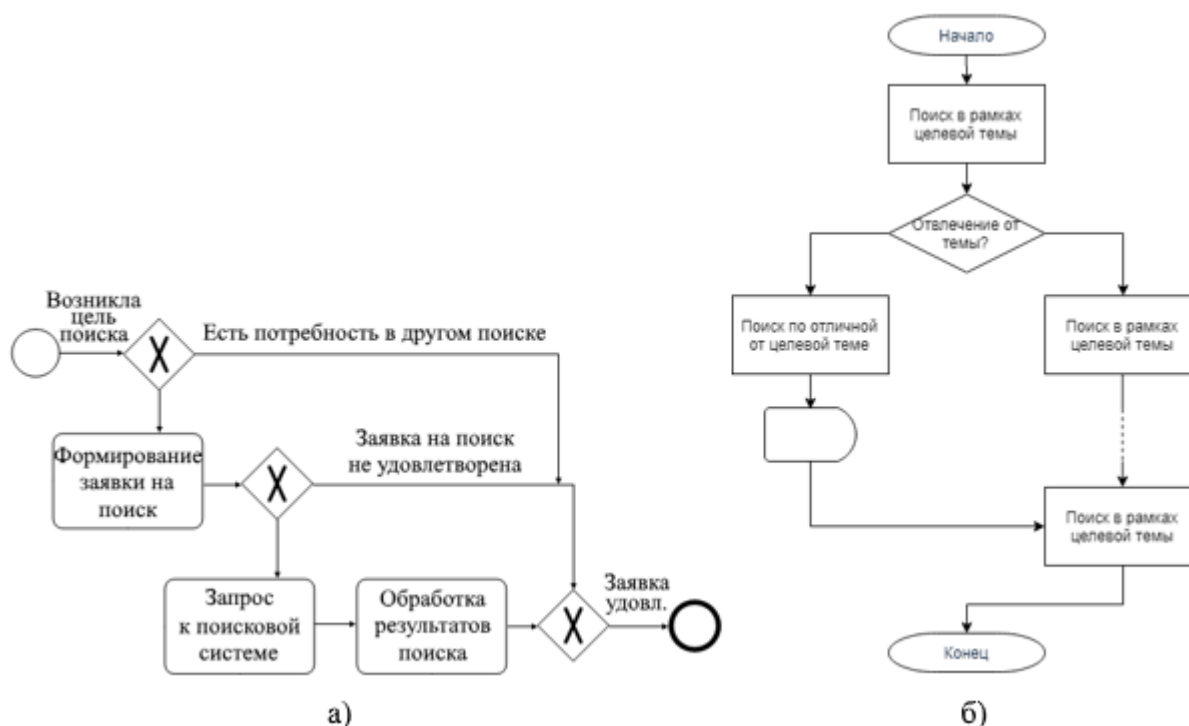


Рис.2 – Схема без отвлечений внимания (а); схема с отвлечением внимания оператора (б)

Таблица 1. – Распределение количества отвлечений внимания

Временной промежуток	КМОВ	Временной промежуток	КМОВ
9–10 часов	18	13–14 часов	24
10–11 часов	14	14–15 часов	14
11–12 часов	8	15–16 часов	8
12–13 часов	10	16–17 часов	9

На основании имеющихся данных, на **Рис.3** продемонстрированы графики зависимости отвлечений внимания по часам в рамках рабочего дня. Пунктирная кривая на графике – усредненная кривая отвлечений внимания.

Представленная кривая прямой зависимости отвлечений внимания и усредненная кривая, полученная из статистических данных, иллюстрируют тенденцию резких скачков МОВ, связанную с периодами рабочего времени. Количественные оценки МОВ позволят, в дальнейшем, строить рабочий процесс с учетом этих данных. Например, в условиях роста производственной нагрузки и требования оперативности ИП, реконфигурировать процессы по функциональным моделям (**Рис.2**), осуществляя переходы из одного представления в другое (от схемы **Рис.2,б** к схеме процесса на **Рис.2,а**).

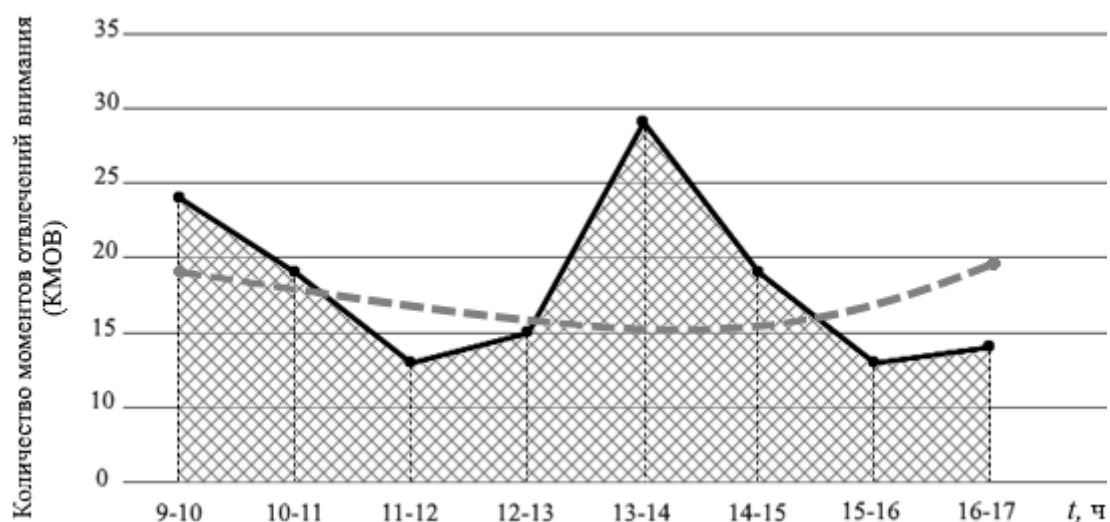


Рис.3 – График зависимости отвлечений внимания по часам

Таким образом, приведенный пример отражает возможности формального моделирования в рамках управления производственными процессами ресурсоемких предприятий. Рассмотрение его с точки зрения процесса ИП позволило сформулировать описания системы с точки зрения работы операторов. Дальнейшие исследования авторов будут направлены на детализацию описания рассматриваемого процесса.

Библиографический список.

1. Mark, G. The cost of interrupted work: More speed and stress / G. Mark, D. Gudith, U. Klocke // Proceeding of the twenty-sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems Association for Computing Machinery. 2008. P. 107–110.
2. Котов, Э.М. Исследование моделей информационного поиска / Э.М. Котов, А.Н. Целых // Известия Южного федерального университета, 2009, С. 163 – 168.
3. Советов, Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев // – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
4. Прокимнов, Н.Н. Структурно-функциональное моделирование деловых процессов / Н.Н. Прокимнов // Прикладная информатика. – 2011. – № 5 (35). – С. 25–38.
5. Нотация IDEF0. [Электронный ресурс]. Доступен на: <https://www.businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/idef0> (02.05.2019).

Bibliograficheskiy spisok.

1. Mark, G. The cost of interrupted work: More speed and stress / G. Mark, D. Gudith, U. Klocke // Proceeding of the twenty-sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems Association for Computing Machinery. 2008. P. 107–110.
2. Kotov, E.M. Issledovanie modelej informacionnogo poiska / E.M. Kotov, A.N.

- Celyh // Izvestiya YUzhnogo federal'nogo universiteta, 2009, S. 163 – 168.
3. Sovetov, B.YA. Modelirovanie sistem / B.YA. Sovetov, S.A. YAKovlev // – M.: Vysshaya shkola, 2001. – 343 s.
4. Prokimnov, N.N. Strukturno-funkcional'noe modelirovanie delovyh processov / N.N. Prokimnov // Prikladnaya informatika. – 2011. – № 5 (35). – S. 25–38.
5. Notatsiya IDEF0. [Elektronnyy resurs]. Dostupen na: <https://www.businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/idef0> (02.05.2019).

Чупрынин Евгений Александрович, ch.evgenii.01@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

Доронина Юлия Валентиновна, д-р техн. наук, проф., juvado@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

FUNCTIONAL MODELING AS A WAY TO DESCRIBE THE INFORMATION SEARCH PROCESS

E. A. Chuprynin, Y. V. Doronina

The process of information search in the Internet on the basis of functional modeling is considered. The characteristics of such a process are described. A detailed description of the operations that make up the process under consideration is made. It has allowed to receive hierarchy of functional models on which it is possible to carry out reorganization, development and management of processes of information search.

Key words: information search, information system, data analysis, functional modeling, organizational procedures.

Chuprynin Evgenii Aleksandrovich, ch.evgenii.01@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Doronina Yulia Valentinovna, doctor of technical sciences, professor, juvado@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЭЛЕМЕНТА С ОБЕСЦЕНИВАЮЩИМИ ОТКАЗАМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ФАЗОВОГО УКРУПНЕНИЯ СИСТЕМ

Копп В.Я.¹, Заморёнов М.В.², Чаленков Н.И.³, Скатков И.А.⁴

Аннотация. Приведен численный метод фазового укрупнения полумарковских систем с общим фазовым пространством состояний. Рассмотрено применение данного метода при моделировании производственного элемента с обесценивающими отказами. Составлена и решена система уравнений для определения вида искомой функции распределения. Проведенное сравнение результатов моделирования показало правильность приведенного метода.

Ключевые слова. Полумарковская система, алгоритм фазового укрупнения, функция распределения, непрерывные состояния, времена пребывания в состояниях, плотности вероятностей перехода, вложенная цепь Маркова.

Одним из наиболее мощных методов моделирования стохастических систем является аппарат полумарковских процессов с общим фазовым пространством состояний, общая теория которых построена академиком Королуком В.С. и его школой [1-6]. Однако, ряд этапов моделирования крайне сложно поддается формализации и требует решения интегральных уравнений, ядра которых содержат суммы и разности переменных [7-14]. Данная задача пока не имеет решения в общем виде, хотя для ряда случаев решения находятся.

Указанная проблема ограничивает использование аппарата полумарковских процессов при моделировании сложных систем.

Последние исследования в этой области позволяют предложить метод определения вида функции распределения исследуемых случайных величин с использованием численных процедур. Предложенные в [15] лемма и теорема дают возможность определить вид функции распределения с точностью до констант, которые определяются численным методом.

Данный подход настолько упрощает задачу моделирования, что создает все предпосылки для автоматизации процесса построения моделей, что делает возможным использование аппарата полумарковских процессов для широкого круга научных сотрудников и инженеров, а также значительно уменьшает время построения полумарковских моделей.

Целью данной работы является подтверждение правильности предложенного метода укрупнения полумарковских систем с общим фазовым пространством состояний.

В классическом случае для осуществления фазового укрупнения ПМ систем используется формула, предложенная Королуком В.С., для определения функции распределения случайной величины γ , являющейся разностью

случайных величин (СВ) α и β при условии, что $\alpha > \beta$. В литературе она обозначается $\gamma = [\alpha - \beta]^+$, а выражение для ее функции распределения имеет вид:

$$F_{\gamma}(t) = \frac{\int_0^{\infty} [F_1(t+y) - F_1(y)] dF_2(y)}{\int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_2(t) dt}, \quad (1)$$

где $F_1(t)$ – функция распределения СВ α , а $F_2(t)$ и $f_2(t)$ – функция и плотность распределения СВ β .

Данная формула (1) пригодна для случая, когда рассматриваются просто случайные величины (СВ) α и β с функциями распределения (ФР) $F_1(t)$ и $F_2(t)$, имеющими плотности распределения (ПР) $f_1(t)$ и $f_2(t)$. В ряде случаев, когда эта формула применяется однократно, такой прием очень удобен. Однако в случае ее многократного использования, возникают значительные сложности, так как получаются крайне громоздкие выражения, переполняющие память компьютера. Поэтому в [16] на основе доказанной леммы была решена задача отыскания вида функции, позволяющей абсолютно точно аппроксимировать выражение (1), являющееся смесью.

В формуле (1) выражение

$$\frac{[F_1(t+y) - F_1(y)]}{\int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_2(t) dt}$$

представляет собой зависящее от действительного параметра $y > 0$ семейство функций распределения, а $F_2(t)$ – весовую функцию.

Доказанная в [15] лемма сформулирована в следующей форме: функция $F_{\gamma}(t)$ распределения времени разности двух СВ $(\alpha - \beta)$ с функциями распределения $F_1(t)$ и $F_2(t)$ соответственно, при условии, что $(\alpha > \beta)$, определяемая выражением

$$F_{\gamma}(t) = \frac{\int_0^{\infty} F_1(t+y) f_2(y) dy - \int_0^{\infty} F_1(y) f_2(y) dy}{\int_0^{\infty} \bar{F}_1(y) f_2(y) dy},$$

с учетом того, что

$$F_2(t) = 1_X(t) = \begin{cases} 1, & t \geq x_B; \\ 0, & t < x_B, \end{cases}$$

имеет вид

$$F_{\gamma}(t, x) = \frac{F_1(t + x_B) - F_1(x_B)}{\bar{F}_1(x_B)},$$

где значение параметра x_B выбирается из равенства

$$F_{\gamma}(y) = \frac{\int_0^{\infty} [F_1(t+y) - F_1(y)] f_2(y) dy}{\int_0^{\infty} \bar{F}_1(y) f_2(y) dy} = \frac{F_1(t+x_B) - F_1(x_B)}{\bar{F}_1(x_B)}. \quad (2)$$

Если же вместо СВ β рассматривается простой процесс восстановления, порождаемый ФР $F_2(t)$, то есть со СВ $\beta_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k$, где $\beta_k = \sum_{i=1}^k \beta$ с ПР $f_2^{(*)k}(t)$, β – случайная величина с ПР $f_2(t)$, то нужно пользоваться формулой, полученной в [17]:

$$F_{\alpha-\beta_{\Sigma}}(t) = P\{[\alpha - \beta_{\Sigma}]^+ \leq t\} = \frac{\int_0^{\infty} [F_1(t+y) - F_1(y)] h_2(y) dy}{\int_0^{\infty} [1 - F_1(x)] h_2(x) dx}, \quad (3)$$

где $h_2(y) = \sum_{k=1}^{\infty} f_2^{(*)k}(y) = \sum_{k=1}^{\infty} f_{2,k}(y)$ – плотность функции восстановления.

В случае, если вместо простого процесса восстановления рассматривается непростой процесс, порождаемый ФР $F_{\gamma}(t)$ и $F_2(t)$, то есть со СВ $\beta_{\Sigma} = \gamma + \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k = \gamma + \beta_{\Sigma}$, где СВ β имеет ПР $f_2(t)$, СВ $\beta_k = \sum_{i=1}^k \beta$ имеет ПР $f_2^{(*)k}(t)$, СВ γ является временем первого скачка и имеет ПР $f_{\gamma}(t)$, а СВ β_{Σ} имеет ПР $f_{\gamma}(t) * f_2^{(*)k}(t)$, $(k = 0, \infty)$, то формула (8) неприменима и необходимо пользоваться теоремой о ФР времени пребывания системы в подмножестве непрерывных состояний с учетом непростого процесса восстановления, доказательство которой приведено в [18].

Теорема и вытекающие из нее следствия доказаны в [15].

Теорема. ФР разности СВ α и СВ $\beta_{\Sigma} = \gamma + \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k$ – времени восстановления в одноименном непростом потоке, порождаемом ФР $F_2(t)$ СВ β и ФР $F_{\gamma}(t)$ СВ γ при условии, что $\alpha > \beta_{\Sigma}$, имеет вид:

$$F_{\alpha-\beta_{\Sigma}}(t) = P\{[\alpha - \beta_{\Sigma}]^+ \leq t\} = \frac{\int_0^{\infty} [F_1(t+y) - F_1(y)] h_2^y(y) dy}{\int_0^{\infty} \bar{F}_1(y) h_2^y(y) dy} = \frac{F_1(t+x_B) - F_1(x_B)}{\bar{F}_1(x_B)} \quad (4)$$

где $f_\gamma(y)$ и $h_2^\gamma(y)$ – плотность распределения СВ γ и плотность восстановления потока восстановлений, порождаемого СВ β и γ равная $h_2^\gamma(y) = \sum_{k=0}^{\infty} f_\gamma(y) * f_2^{(*)k}(y)$, а x_B подбирается численно из соотношения (4).

Следствия.

Следствие 1. В частном случае, когда α и β являются просто случайными величинами, и необходимо найти их разность при условии, что $\alpha > \beta$, получается формула (3)

$$F_\gamma(t) = \frac{\int_0^\infty [F_1(t+y) - F_1(y)] dF_2(y)}{\int_0^\infty \bar{F}_1(t) f_2(t) dt} = \frac{F_1(t+x_B) - F_1(x_B)}{\bar{F}_1(x_B)}.$$

Следствие 2. В случае, когда вместо СВ β рассматривается простой процесс восстановления, порождаемый ФР $F_2(t)$, то в соответствии с (3) получается формула

$$F_{\alpha-\beta_\Sigma}(t) = P\{[\alpha - \beta_\Sigma]^+ \leq t\} = \frac{\int_0^\infty [F_1(t+y) - F_1(y)] h_2(y) dy}{\int_0^\infty [1 - F_1(x)] h_2(x) dx} = \frac{F_1(t+x_B) - F_1(x_B)}{\bar{F}_1(x_B)}. \quad (5)$$

Следствие 3. В случае если может произойти не более n восстановлений то получается формула

$$F_{\alpha-\beta_\Sigma^n}(t) = P\{[\alpha - \beta_\Sigma^n]^+ \leq t\} = \frac{\int_0^\infty [F_1(t+y) - F_1(y)] \sum_{n=1}^n \frac{f_\gamma * f_2^{(*)n}(y) dy}{\sum_{k=1}^n P\left\{\alpha > \left(\gamma + \sum_{i=0}^n \beta\right)\right\}}}{\bar{F}_1(x_B)} = \frac{F_1(t+x_B) - F_1(x_B)}{\bar{F}_1(x_B)}. \quad (6)$$

Приведенные выше лемма и Теорема о ФР времени пребывания в подмножестве непрерывных состояний с учётом как простого, так и непростого процесса восстановления на основании выражений (2), (4), (5), (6) позволяют предложить метод фазового укрупнения регенерирующих и нерегенерирующих полумарковских систем, не включающий в себя этап определения стационарного распределения ВЦМ для систем с общим фазовым пространством.

Фазовое укрупнение базируется на двух принципах.

Первый принцип состоит в том, что вид функции распределения, получающийся как разность двух случайных величин при условии, что первая больше вычитаемой, причём вычитаемая может быть как просто случайной величиной, так и простым или непростым процессом восстановления, остаётся одинаковым и определяется только константой x_B , входящей в формулы (4), (5), (6).

Второй принцип предполагает, что, какие-то параметры системы или входящих в неё элементов остаются неизменными. Эти параметры позволяют

сформировать дополнительные условия для определения неизвестных констант, определяющих функции распределения. Так, например, для обслуживающей системы такими параметрами могут быть коэффициент готовности системы и среднее время обслуживания единицы продукции, для чего может использоваться теорема о математическом ожидании времени пребывания системы в заданном подмножестве состояний.

После введения констант x_{bi} , $(i = \overline{1, q})$, где q – число состояний система считается дискретным. Уравнения для определения искомых параметров записываются в следующем порядке.

1. Определяются времена пребывания в состояниях и соответствующие им функции распределения.
2. Определяются вероятности переходов.
3. Определяется стационарное распределение ВЦМ, что для дискретной системы не представляет сложности:

$$\rho_k = \sum_{r \in E} \rho_r \cdot p_{rk}.$$

4. Определяется стационарное распределение полумарковского процесса:

$$\pi_k = \frac{\rho_k \cdot m_k}{\sum_{k \in E} \rho_k \cdot m_k}.$$

5. Составляются q дополнительных условий, которые запишем в общем виде:

$$\Pi_{zi} = \Pi_{mi}(F_q, \rho_q, \pi_q), (i = \overline{1, q}), \quad (7)$$

где Π_{zi} – неизменный параметр; $\Pi_{mi}(F_q, \rho_q, \pi_q, x_{bq})$ – этот же параметр, вычисленный по модели.

Система уравнений для определения параметров x_{bi} , $(i = \overline{1, q})$ имеет вид:

$$\begin{cases} \rho_k = \sum_{r \in E} \rho_r \cdot p_{rk}; \\ \pi_k = \frac{\rho_k \cdot m_k}{\sum_{k \in E} \rho_k \cdot m_k}; \\ \Pi_{zi} = \Pi_{mi}(F_q, \rho_q, \pi_q, x_{bq}), (i = \overline{1, q}). \end{cases} \quad (8)$$

Система уравнений (8) решается численно относительно параметров x_{bi} $(i = \overline{1, q})$.

Пример.

Исследуется модель функционирования ПЭ при условии, что в случае отказа ПЭ обслуживание продукции прерывается, а после восстановления его работоспособности обслуживание единицы продукции начнется сначала, то

есть время, затраченное на обслуживание единицы продукции до момента отказа ПЭ, обесценивается [1].

Необходимо определить ФР $F_\varepsilon(t)$ СВ ε - времени между двумя соседними моментами окончания обслуживания продукции с учетом отказов ПЭ, а также математическое ожидание, дисперсию указанной СВ и производительность ПЭ.

Будем предполагать, что время обслуживания единицы продукции ПЭ - СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P\{\alpha_1 \leq t\}$. Время безотказной работы ПЭ - СВ α_2 с ФР $F_2(t) = P\{\alpha_2 \leq t\}$, время восстановления ПЭ - СВ β_2 с ФР $G_2(t) = P\{\beta_2 \leq t\}$. СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_2$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания m_{f1}, m_{f2}, m_{g2} и дисперсии; у ФР $F_1(t), F_2(t), G_2(t)$ существуют плотности $f_1(t), f_2(t), g_2(t)$. При отказе ПЭ обслуживание единицы продукции прерывается, после восстановления его работоспособности прерванное обслуживание единицы продукции начинается сначала.

Для описания функционирования элемента используем процесс марковского восстановления ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ и соответствующий ему полумарковский процесс ПМП $\xi(t)$ с состояниями:

10х – ПЭ работоспособен, началось обслуживание очередной единицы продукции; время, оставшееся до отказа ПЭ, равно $x > 0$;

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

20 – произошло восстановление работоспособности ПЭ, прерванное обслуживание единицы продукции начинается сначала;

21 – произошел отказ ПЭ, обслуживание единицы продукции прервано.

Временная диаграмма функционирования ПЭ приведена на Рис.1, граф переходов системы – на Рис.2.

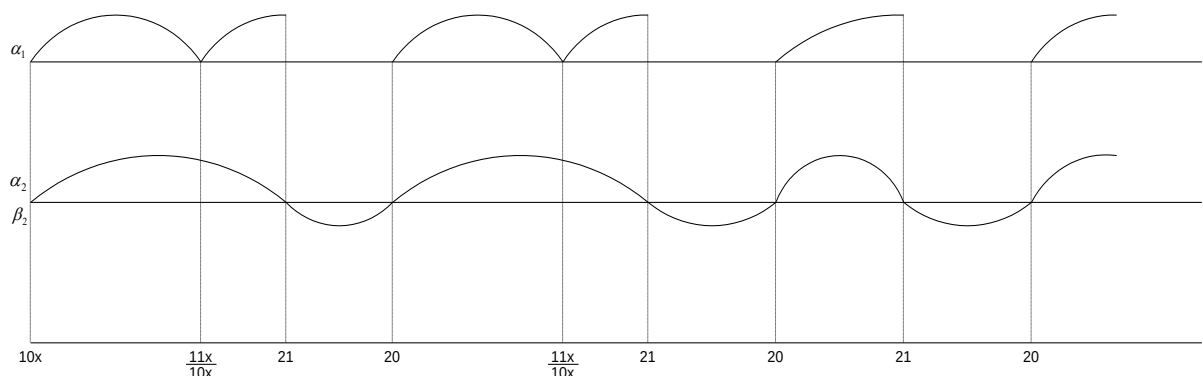


Рис.1 – Временная диаграмма функционирования ПЭ

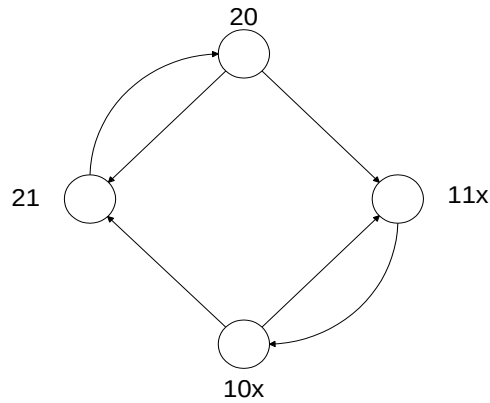


Рис.2 – Граф состояний ПЭ

Фазовое пространство состояний имеет вид

$$E = \{10x, 11x, 20, 21\}.$$

Времена пребывания в состояниях равны:

$$\nu_{10x} = x \wedge \alpha_1; \quad \nu_{11x} = 0; \quad \nu_{21} = \beta_2; \quad \nu_{20} = \alpha_1 \wedge \alpha_2.$$

ФР времен пребывания в состояниях имеют вид:

$$F_{21}(t) = G_2(t);$$

$$\bar{F}_{20}(t) = \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_2(t);$$

$$\bar{F}_{10x}(t) = \bar{F}_x(t) \cdot \bar{F}_1(t),$$

где
$$F_x(t) = \frac{F_2(t+x) - F_2(x)}{\bar{F}_2(x)}.$$

Тогда вероятности переходов ВЦМ равны:

$$P_{10}^{11} = \int_0^{\infty} F_1(t) f_x(t) dt; \quad P_{10x}^{21} = \int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_x(t) dt; \quad P_{11x}^{10x} = 1;$$

$$P_{20}^{11} = \int_0^{\infty} F_1(t) f_2(t) dt; \quad P_{20}^{21} = \int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_2(t) dt; \quad P_{21}^{20} = 1.$$

Система уравнений для стационарных плотностей имеет вид:

$$\begin{cases} \rho_{10} = \rho_{11} = \rho_{10} P_{10}^{11} + \rho_{20} P_{20}^{11} \\ \rho_{20} = \rho_{21} = \rho_{10} P_{10}^{21} + \rho_{20} P_{20}^{21} \\ \rho_{10} + \rho_{11} + \rho_{20} + \rho_{21} = 1. \end{cases}$$

Решением системы является

$$\begin{cases} \rho_{10} = \rho_{11} = \frac{P_{20}^{11}}{2 \cdot (P_{10}^{21} + P_{20}^{11})} \\ \rho_{20} = \rho_{21} = \frac{P_{10}^{21}}{2 \cdot (P_{10}^{21} + P_{20}^{11})}. \end{cases}$$

Граф состояний системы с дискретными состояниями представлен на **Рис.3.**

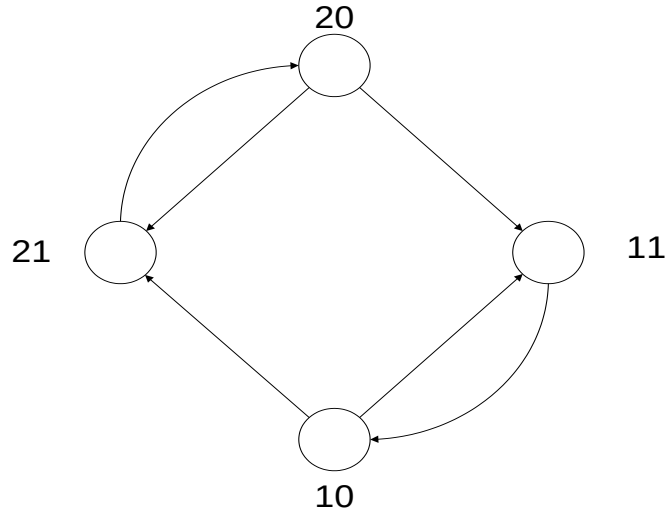


Рис.3 – Граф состояний системы с дискретными состояниями

Стационарные вероятности ПМП равны:

$$\begin{cases} \pi_{10} = \frac{\rho_{10}m_{10}}{\rho_{10}m_{10} + \rho_{11}m_{11} + \rho_{20}m_{20} + \rho_{21}m_{21}}, \\ \pi_{11} = \frac{\rho_{11}m_{11}}{\rho_{10}m_{10} + \rho_{11}m_{11} + \rho_{20}m_{20} + \rho_{21}m_{21}}, \\ \pi_{20} = \frac{\rho_{20}m_{20}}{\rho_{10}m_{10} + \rho_{11}m_{11} + \rho_{20}m_{20} + \rho_{21}m_{21}}, \\ \pi_{21} = \frac{\rho_{21}m_{21}}{\rho_{10}m_{10} + \rho_{11}m_{11} + \rho_{20}m_{20} + \rho_{21}m_{21}}. \end{cases}$$

Необходимо определить вид функции $F_x(t)$, для чего требуется определить константу x .

Для этого определим коэффициент готовности системы:

$$K_{Г1} = \pi_{10} + \pi_{20}; \quad K_{Г2} = \frac{m_{f2}}{m_{f2} + mg_2}.$$

Отсюда:

$$\pi_{10} + \pi_{20} = \frac{m_{f2}}{m_{f2} + mg_2}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет нам составить и решить систему уравнений для определения вида функции $F_x(t)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{10x}^{21} = \int_0^{\infty} \bar{F}_1(t) f_x(t) dt \\ P_{20}^{11} = \int_0^{\infty} F_1(t) f_2(t) dt \\ \rho_{10} = \frac{P_{20}^{11}}{2 \cdot (P_{10}^{21} + P_{20}^{11})} \\ \rho_{11} = \frac{P_{20}^{11}}{2 \cdot (P_{10}^{21} + P_{20}^{11})} \\ \rho_{20} = \frac{P_{10}^{21}}{2 \cdot (P_{10}^{21} + P_{20}^{11})} \\ \rho_{21} = \frac{P_{10}^{21}}{2 \cdot (P_{10}^{21} + P_{20}^{11})} \\ \pi_{10} = \frac{\rho_{10} m_{10}}{\rho_{10} m_{10} + \rho_{11} m_{11} + \rho_{20} m_{20} + \rho_{21} m_{21}} \\ \pi_{11} = \frac{\rho_{11} m_{11}}{\rho_{10} m_{10} + \rho_{11} m_{11} + \rho_{20} m_{20} + \rho_{21} m_{21}} \\ \pi_{20} = \frac{\rho_{20} m_{20}}{\rho_{10} m_{10} + \rho_{11} m_{11} + \rho_{20} m_{20} + \rho_{21} m_{21}} \\ \pi_{21} = \frac{\rho_{21} m_{21}}{\rho_{10} m_{10} + \rho_{11} m_{11} + \rho_{20} m_{20} + \rho_{21} m_{21}} \\ \pi_{10} + \pi_{20} = \frac{m_{f2}}{m_{f2} + m g_2} \\ F_x(t) = \frac{F_2(t+x) - F_2(x)}{\bar{F}_2(x)}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Решив систему уравнений (10), получим искомый вид функции распределения $F_x(t)$.

На данном этапе можно констатировать факт того, что определены все характеристики укрупненной системы.

После чего можно применить метод траекторий, позволяющий точно определять функции распределения случайных величин, описывающих процесс функционирования исследуемой системы, а именно функцию распределения времени обслуживания единицы продукции с учетом влияния обесценивающих отказов. Решение этой задачи, но с использованием классического алгоритма фазового укрупнения, предложенного академиком Королёком В.С., приведено в [19]:

$$F_{\Sigma}^0(t) = F_1^T(t) \cdot P_1^T + F_2^T(t) \cdot P_2^T.$$

где

$$F_1^T(t) = F_{10}(t);$$

$$F_2^T(t) = F_{10}(t) * F_{21}^2(t) * F_{20}^2(t),$$

* – знак операции свертки,

$$P_1^T = P_{10}^{11};$$

$$P_2^T = P_{10}^{21}.$$

$$F_{20}^2(s) = \frac{\hat{F}_{20}(s)}{c_{20} - (c_{20} - 1)\hat{f}_{20}(s)};$$

$$F_{21}^2(s) = \frac{\hat{F}_{21}(s)}{c_{21} - (c_{21} - 1)\hat{f}_{21}(s)},$$

$$c_{20}^2 = \frac{\rho_{20}}{\rho_{20} \cdot P_{20}^{11}} = \frac{1}{P_{20}^{11}};$$

$$c_{21}^2 = \frac{\rho_{21}}{\rho_{21} \cdot P_{20}^{11}} = \frac{1}{P_{20}^{11}}.$$

Результаты моделирования следующие.

Исходными данными для моделирования служат ФР $F_1(t)$, $F_2(t)$ и $G_2(t)$, распределенные по закону Эрланга второго порядка с параметрами ν , λ , μ соответственно. Причем

$$f_1(t) = \nu^2 \cdot t \cdot e^{-\nu \cdot t}; \quad f_2(t) = \lambda^2 \cdot t \cdot e^{-\lambda \cdot t}; \quad g_2(t) = \mu^2 \cdot t \cdot e^{-\mu \cdot t},$$

где $\nu = 10$ (ч^{-1}); $\lambda = 0,25$ (ч^{-1}); $\mu = 1$ (ч^{-1}).

Математическое ожидание СВ ε -времени цикла обслуживания единицы продукции ПЭ с учетом его отказов, определенные двумя методами:

- известным методом, использующим АФУ [1]

$$m_{\text{обсл}} = 0,25157209 \text{ ч};$$

- предлагаемым методом:

$$m_{\Sigma}^{\theta} = 0,25157209 \text{ ч};$$

На **Рис.4** показаны результаты моделирования. Очевидно, что результаты моделирования практически совпадают.

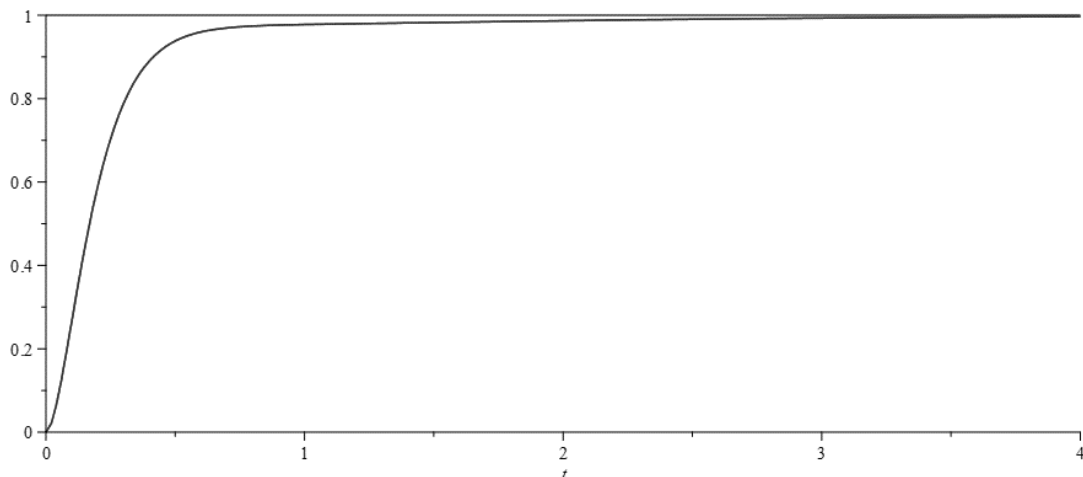


Рис.4 – Сравнение результатов моделирования

Заключение

Результаты моделирования доказывают правильность предложенного метода.

Предлагаемый метод в совокупности с методом траекторий [19] или методом путей [20] позволяет автоматизировать процесс создания полумарковских моделей для анализа стохастических систем, что дает возможность в дальнейших исследованиях приступить к созданию программного комплекса автоматизированного построения полумарковских моделей и получения результатов моделирования.

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.Королук В.С. Стохастические модели систем / Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: Наук. думка. 1989. 208 с.
- 2.Королук, В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надёжности систем / Королук В.С., Турбин А.Ф. // Киев: Наук. думка.1982. 236 с.
- 3.Ushakov, I.A. Probabilistic Reliability Models (Wiley, 2012).
- 4.Korolyuk V.S., Swishchuk A., Semi-Markov Random Evolutions (Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Boston, London, 1995).
5. Korolyuk V.S., Limnios N., Stochastic Systems in Merging Phase Space (World Scientific, Imperial College Press, 2005).
- 6.Королук, В.С. Фазовое укрупнение сложных систем / В.С. Королук, А.Ф. Турбин. – К.: «Вища школа», 1978. – 112 с.
- 7.Yao D.D., Buzacott J.A., Flexible Manufacturing Systems: A Review of Analytical Models// Management Science, 32 (1986) 890-905.
- 8.Handbook of Stochastic Models and Analysis of Manufacturing System Operations / MacGregor Smith J., Tan B. (Eds.) // Springer-Verlag New York, 2013.
- 9.Curry G.L., Feldman R.M., Manufacturing Systems Modeling and Analysis, 2nd Edition (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011), p. 338.
10. Limnios N., Nikulin M., Recent Advances in Reliability Theory: Methodology, Practice, and Inference, eds. N. Lim-nios, M. Nikulin (Springer Science+Business Media, New York, 2000), p. 514.
11. Limnios N., Oprisan G., Semi-Markov Processes and Reliability (Springer Science+Business Media, New York, 2001).
12. Semi-Markov Models and Applications / J. Jansen, N. Limnios (Eds.) // Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 1999.
13. Silvestrov D., Silvestrov S., Nonlinearly Perturbed Semi-Markov Processes (Springer, Cham, 2017), p. 143.
14. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. Пер. с нем. / Байхельт Ф., Франкен П. // М.: Радио и связь, 1988. 392 с.

15. Kopp, V.Ja. The numerical method of the phase integration of non-regenerating semi-Markov systems / V.Ja. Kopp, M.V. Zamoryonov, N.I. Chalenkov. // Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems, Vol. XXXVIII, No.6, 2018 www.isi.az/journal/2018/6-00.pdf

16. Копп, В.Я. Фазовое укрупнение полумарковской системы, состоящей из двух последовательно соединенных технологических ячеек / В.Я. Копп, М.В. Заморёнов, Н.И. Чаленков // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. Т.4, Севастополь: Изд-во СевГУ, 2018 с. 56-66.

17. Копп, В.Я. Разновидность фазового укрупнения полумарковских систем на примере моделирования синхронной автоматизированной линии / В.Я. Копп, М.В. Заморёнов, Н.И. Чаленков // Интеллектуальные системы в производстве. Т.16 №3, Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2018 с.97-102

18. Zamoryonov, M.V. Simulation of a single-component system using the trajectories method taking into account the scheduling preventive maintenance / M.V. Zamoryonov, V.Ya. Kopp, O.V. Chengar, Yu.L. Rapatskiy // Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017), Vol 2 / Springer International Publishing Switzerland 2017. – P. 264-271

19. Заморёнов, М.В. Моделирование процесса функционирования обслуживающего устройства с необесценивающими отказами методом путей. / М.В. Заморёнов, В.Я. Копп, Д.В. Заморёнова, А.А. Скидан. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 7: в 2 ч. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016 с. 71-82.

Bibliograficheskiy spisok

1.Korolyuk V.S. Stohasticheskie modeli sistem / Otv. red. A.F. Turbin. Kiev: Nauk. dumka. 1989. 208 s.

2.Korolyuk, V.S. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadyozhnosti sistem / Korolyuk V.S., Turbin A.F. // Kiev: Nauk. dumka.1982. 236 s.

3.Ushakov, I.A. Probabilistic Reliability Models (Wiley, 2012).

4.Korolyuk V.S., Swishchuk A., Semi-Markov Random Evolutions (Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Boston, London, 1995).

5. Korolyuk V.S., Limnios N., Stochastic Systems in Merging Phase Space (World Scientific, Imperial College Press, 2005).

6.Korolyuk, V.S. Fazovoe ukрупnenie slozhnyh sistem / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: «Vishcha shkola», 1978. – 112 s.

7.Yao D.D., Buzacott J.A., Flexible Manufacturing Systems: A Review of Analytical Models// Management Science, 32 (1986) 890-905.

8.Handbook of Stochastic Models and Analysis of Manufacturing System Operations / MacGregor Smith J., Tan B. (Eds.) // Springer-Verlag New York, 2013.

9.Curry G.L., Feldman R.M., Manufacturing Systems Modeling and Analysis, 2nd Edition (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011), p. 338.

10. Limnios N., Nikulin M., Recent Advances in Reliability Theory: Methodology, Practice, and Inference, eds. N. Lim-nios, M. Nikulin (Springer Science+Business Media, New York, 2000), p. 514.
11. Limnios N., Oprisan G., Semi-Markov Processes and Reliability (Springer Science+Business Media, New York, 2001).
12. Semi-Markov Models and Applications / J. Jansen, N. Limnios (Eds.) // Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 1999.
13. Silvestrov D., Silvestrov S., Nonlinearly Perturbed Semi-Markov Processes (Springer, Cham, 2017), p. 143.
14. Bajhel't, F. Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskij podhod. Per. s nem. / Bajhel't F., Franken P. // M.: Radio i svyaz', 1988. 392 s.
15. Kopp, V.Ja. The numerical method of the phase integration of non-regenerating semi-Markov systems / V.Ja. Kopp, M.V. Zamoryonov, N.I. Chalenkov. // Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems, Vol. XXXVIII, No.6, 2018 www.isi.az/journal/2018/6-00.pdf
16. Kopp, V.YA. Fazovoe ukрупnenie polumarkovskoj sistemy, sostoyashchej iz dvuh posledovatel'no soedinennyh tekhnologicheskikh yacheek / V.YA. Kopp, M.V. Zamoryonov, N.I. Chalenkov // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii. T.4, Sevastopol': Izd-vo SevGU, 2018 s. 56-66.
17. Kopp, V.YA. Raznovidnost' fazovogo ukрупneniya polumarkovskih sistem na primere modelirovaniya sinhronnoj avtomatizirovannoj linii / V.YA. Kopp, M.V. Zamoryonov, N.I. Chalenkov // Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. T.16 №3, Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2018 s.97-102
18. Zamoryonov, M.V. Simulation of a single-component system using the trajectories method taking into account the scheduling preventive maintenance / M.V. Zamoryonov, V.Ya. Kopp, O.V. Chengar, Yu.L. Rapatskiy // Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017), Vol 2 / Springer International Publishing Switzerland 2017. – P. 264-271
19. Zamoryonov, M.V. Modelirovanie processa funkcionirovaniya obsluzhivayushchego ustrojstva s neobescenivayushchimi otkazami metodom putej. / M.V. Zamoryonov, V.YA. Kopp, D.V. Zamoryonova, A.A. Skidan. // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 7: v 2 ch. CH. 1. Tula: Izd-vo TulGU, 2016 s. 71-82.

Копп Вадим Яковлевич — д.т.н., профессор кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», СевГУ. Область научных интересов: математическое моделирование, стохастические модели систем, автоматизация технологических процессов, многократные измерения. Число научных публикаций — 104. v_kopp@mail.ru; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ; м.т. +7(978)742-00-07.

Заморёнов Михаил Вадимович — к.т.н., доцент кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы», СевГУ. Область

научных интересов: математическое моделирование, стохастические модели систем, схемотехника. Число научных публикация — 65. zamoryonoff@gmail.com; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ; м.т. +7(978)742-00-03.

Чаленков Никита Игоревич — аспирант кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», СевГУ. Область научных интересов: математическое моделирование, стохастические системы, разработка мехатронных систем. Число научных публикаций — 12. chalenkov-nikita@yandex.ru; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ; м.т. +7(978)711-56-50.

Скатков Иван Александрович — доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», СевГУ. Область научных интересов: информатика, программирование, численные методы, математическое моделирование. Число научных публикаций — 14. sks144@yandex.ru; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ; +7(978)829-92-73

MODELING OF OPERATING ELEMENT FUNCTIONING WITH DECREASING FAILURES WHEN USING THE NUMERICAL METHOD OF PHASE ENHANCEMENT OF SYSTEMS

Kopp V.Ya., Zamorenov M.V., Chalenkov N.I., Skatkov I.A.

A numerical method of phase enlargement of semi-Markov systems with a common phase state space is presented. The application of this method in modeling a production element with depreciating failures is considered. A system of equations is compiled and solved to determine the form of the desired distribution function. The comparison of simulation results showed the correctness of the above method.

Keywords: semi-Markov system; phase enlargement algorithm; distribution function; continuous states; time spent in states; transition probability density; nested Markov chain.

Kopp Vadim Yakovlevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Instrument Systems and Automation of Technological Processes, SevSU. Research interests: mathematical modeling, stochastic models of systems, automation of technological processes, multiple measurements. The number of publications - 104. v_kopp@mail.ru; st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; phone +7 (978) 742-00-07.

Zamoryonov Mikhail Vadimovich - Ph.D., Associate Professor, Department of Information Technology and Computer Systems, SevSU. Research interests:

mathematical modeling, stochastic models of systems, circuitry. The number of publications is 65. zamoryonoff@gmail.com; st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; phone +7 (978) 742-00-03.

Chalakov Nikita Igorevich - graduate student of the department of Instrument Systems and Automation of Technological Processes, SevSU. Research interests: mathematical modeling, stochastic systems, development of mechatronic systems. The number of publications - 12. chalakov-nikita@yandex.ru; st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; phone +7 (978) 711-56-50.

Skatkov Ivan Aleksandrovich - Ph.D., Associate Professor, of Instrument Systems and Automation of Technological Processes, SevSU. Research interests: computer science, programming, numerical methods, mathematical modeling. The number of publications - 14. sks144@yandex.ru; st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; phone +7 (978) 829-92-73

СТАЦИОНАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УПРЕЖДАЮЩИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ПО ОСТАТОЧНОЙ НАРАБОТКЕ

Обжерин Ю.Е.¹, Бойко Е.Г.², Федоренко С.Н.³

Аннотация. Одним из методов повышения надежности и эффективности технических систем является упреждающее восстановление, которое позволяет снизить последствия отказов системы. В статье рассматривается полумарковская модель контроля скрытых отказов технической системы с учетом упреждающего восстановления за оставшееся время до следующего скрытого отказа. Найдены стационарные характеристики надежности и эффективности системы. Полученные результаты могут быть использованы для оценки эффективности применения упреждающего восстановления.

Ключевые слова. Техническая система, упреждающее восстановление, стационарные характеристики, полумарковский процесс.

Введение. Одним из методов повышения надежности и эффективности технических систем является упреждающее восстановление [1 – 5]. Упреждающее восстановление позволяет уменьшить последствия старения и износа элементов системы до появления скрытых отказов. Скрытый отказ – это отказ, который может быть обнаружен только в результате проведения контроля. При использовании упреждающего восстановления возникает задача определения оптимального периода проведения контроля системы [6].

Теория полумарковских процессов в настоящее время широко используется для моделирования систем различного назначения [7-11].

В [5] рассматривается полумарковская модель контроля скрытых отказов технической системы с упреждающим восстановлением с учетом времени, прошедшего с момента последнего скрытого отказа системы.

В этой статье построена полумарковская модель технической системы, которая учитывает контроль скрытых отказов, и проведение упреждающего восстановления с учетом времени, оставшегося до следующего скрытого отказа. Найдено стационарное распределение вложенной цепи Маркова. Получены стационарные характеристики надежности и эффективности системы, позволяющие анализировать влияние упреждающего восстановления на функционирование системы.

Описание системы. Рассматривается система S , состоящая из одного компонента, выполняющего определенные функции и аппаратуры контроля его работоспособности. Система функционирует следующим образом. В начальный момент времени компонент приступает к работе, контроль включен. Время безотказной работы (ВБР) компонента – случайная величина (СВ) α с функцией распределения (ФР) $F(t) = P\{\alpha \leq t\}$ и плотностью распределения (ПР) $f(t)$. Контроль проводится через случайное время δ с ФР $R(t) = P\{\delta \leq t\}$ и

ПР $r(t)$. Отказ компонента обнаруживается только в результате проведения контроля (скрытый отказ); на время проведения контроля работа компонента приостанавливается. Длительность проведения контроля – СВ γ с ФР $V(t) = P\{\gamma \leq t\}$ и ПР $v(t)$. Если в результате проведения контроля установлено, что компонент работоспособен и его оставшаяся наработка до отказа меньше заданного уровня $\mu > 0$, то проводится упреждающее восстановление компонента. В случае, когда оставшаяся наработка до скрытого отказа больше заданного уровня $\mu > 0$, компонент продолжает работу. Если в результате контроля обнаружен скрытый отказ компонента, то проводится его обычное восстановление; время упреждающего или обычного восстановления – СВ β с ФР $G(t) = P\{\beta \leq t\}$ и ПР $g(t)$. На период любого восстановления контроль приостанавливается, после восстановления все свойства компонента обновляются. Предполагается, что СВ α , β , δ , γ независимы и имеют конечные математические ожидания.

Построение полумарковской модели. Функционирование системы S опишем полумарковским процессом (ПМП) $\xi(t)$ с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний. Введем следующее множество E полумарковских состояний системы:

$$E = \{111, 2\hat{1}0x, 211x, 2\tilde{2}2, 101x, 2\hat{0}0, 222\}.$$

Содержательный смысл кодов состояний следующий:

111 – компонент восстановлен и приступил к работе, контроль включен;

$2\hat{1}0x$ – начался контроль, компонент работоспособен и отключен, время, оставшееся до отказа компонента равно $x > 0$;

211x – проведен контроль, время до отказа компонента, равное $x > 0$, больше заданного уровня μ , работоспособный компонент продолжил работу;

$2\tilde{2}2$ – проведен контроль, компонент работоспособен, время до отказа компонента меньше заданного уровня μ , началось упреждающее восстановление компонента, контроль приостановлен;

101x – наступил отказ компонента, до начала контроля осталось время $x > 0$;

$2\hat{0}0$ – начался контроль, компонент, находящийся в отказе, отключен;

222 – проведен контроль, обнаружен отказ и началось обычное восстановление компонента, контроль приостановлен.

Временная диаграмма функционирования системы изображена на **Рис.1**.

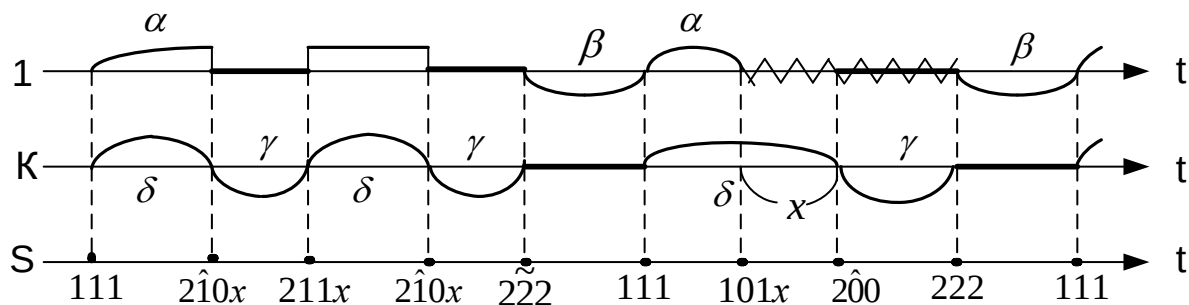


Рис.1 – Временная диаграмма функционирования системы

Определим времена пребывания в состояниях системы. Например, время θ_{211x} пребывания системы в состоянии $211x$ определяется двумя факторами: оставшимся временем x до наступления скрытого отказа компонента и временем δ , определяющим периодичность контроля, следовательно, $\theta_{211x} = \delta \wedge x$. Аналогично определяются времена пребывания в остальных состояниях:

$$\theta_{111} = \alpha \wedge \delta, \theta_{210x} = \gamma, \theta_{222} = \beta, \theta_{101x} = x, \theta_{200} = \gamma, \theta_{222} = \beta \quad (1)$$

Опишем события переходов из состояний системы. События переходов из состояний $111, 211x$ определяются соотношениями (2), (3) соответственно.

$$\{111 \rightarrow 210dx\} = \{\alpha = \delta + x\}, x > 0; \{111 \rightarrow 101dx\} = \{\delta - \alpha \in dx\}, x > 0, \quad (2)$$

$$\{211x \rightarrow 210y\} = \{\delta = x - y\}, x > \mu, y < x,$$

$$\{211x \rightarrow 101y\} = \{\delta = x + y\}, x > \mu, y > 0. \quad (3)$$

Переходы $210x \rightarrow 222, 210x \rightarrow 211x, 222x \rightarrow 111, 101x \rightarrow 200, 200 \rightarrow 222, 222 \rightarrow 111$ происходят с вероятностью единица.

Формулы (2), (3) позволяют найти переходные вероятности вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n; n \geq 0\}$:

$$p_{111}^{210x} = P\{\alpha = \delta + x\} = \int_0^{\infty} f(x+t)r(t)dt, x > 0, \\ p_{111}^{101dx} = P\{\delta - \alpha \in dx\} = \int_0^{\infty} r(x+t)f(t)dt, x > 0, \quad (4)$$

$$p_{211x}^{210y} = P\{\delta = x - y\} = r(x - y), x > \mu, y < x,$$

$$p_{211x}^{101y} = P\{\delta = x + y\} = r(x + y), x > \mu, y > 0,$$

$$P_{210x}^{222} = 1, \text{ если } 0 < x < \mu, P_{210x}^{211x} = 1, \text{ если } x > \mu,$$

$$P_{222}^{111} = P_{101x}^{200} = P_{200}^{222} = P_{222}^{111} = 1.$$

Нахождение стационарного распределения ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$.

Обозначим через $\rho(111), \rho(222), \rho(200), \rho(222)$ значения стационарного

распределения ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ на состояниях 111, $\tilde{2}22$, $2\hat{0}0$, 222 и предположим существование стационарных плотностей $\rho(2\hat{1}0x)$, $\rho(211x)$ и $\rho(101x)$ для состояний $2\hat{1}0x$, $211x$ и $101x$ соответственно. Используя вероятности и плотности вероятностей переходов ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ (4), составим систему интегральных уравнений для нахождения стационарного распределения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(111) = \rho(\tilde{2}22) + \rho(222), \\ \rho(2\hat{1}0x) = \rho(111) \int_0^{\infty} f(x+t)r(t)dt + \int_{x \vee \mu}^{\infty} r(y-x)\rho(211y)dy, \quad x < y, \quad y > \mu, \\ \rho(211x) = \rho(2\hat{1}0x), \quad x > \mu, \\ \rho(\tilde{2}22) = \int_0^{\mu} \rho(2\hat{1}0x)dx, \\ \rho(101x) = \rho(111) \int_0^{\infty} r(x+t)f(t)dt + \int_{\mu}^{\infty} \rho(211y)r(x+y)dy, \quad y > \mu, \\ \rho(2\hat{0}0) = \int_0^{\infty} \rho(101y)dy, \\ \rho(222) = \rho(2\hat{0}0), \\ 2\rho(111) + \rho(2\hat{0}0) + \int_0^{\infty} (\rho(101x) + \rho(2\hat{1}0x))dx + \int_{\mu}^{\infty} \rho(211x)dx = 1. \end{array} \right. \quad (5)$$

Последнее уравнение в системе (5) – условие нормировки.

Методом последовательных приближений [12] можно показать, что решение системы (5) имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 = \rho(111), \\ \rho(2\hat{1}0x) = \rho_0 \int_x^{\infty} h_r(y-x)f(y)dy, \quad x > \mu, \\ \rho(2\hat{1}0x) = \rho_0 \int_0^{\infty} f(x+t)r(t)dt + \rho_0 \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t h_r(t-y)r(y-x)dy, \quad 0 < x < \mu, \\ \rho(211x) = \rho(2\hat{1}0x), \quad x > \mu, \\ \rho(\tilde{2}22) = \rho_0 \int_0^{\infty} f(t)R(t)dt - \rho_0 \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t h_r(t-y)\bar{R}(y)dy, \\ \rho(101x) = \rho_0 \int_0^{\infty} r(x+t)f(t)dt + \rho_0 \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t r(x+y)h_r(t-y)dy, \quad y > \mu, \\ \rho(2\hat{0}0) = \rho_0 \int_0^{\infty} f(t)\bar{R}(t)dt + \rho_0 \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t h_r(t-y)\bar{R}(y)dy, \\ \rho(222) = \rho(2\hat{0}0), \end{array} \right. \quad (6)$$

где, $h_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} r^{*(n)}(t)$ – плотность функции восстановления $H_r(t)$ процесса восстановления, порожденного СВ δ , $r^{*(n)}(t)$ – n -кратная свертка плотности распределения $r(t)$.

Нахождение стационарных характеристик системы. Разобьем фазовое пространство состояний E на следующие два подмножества:

$E_+ = \{111, 211x\}$ – система работоспособна;

$E_- = \{2\hat{1}0x, \tilde{2}2, 101x, 2\hat{0}0, 222\}$ – система находится в отказе.

Среднюю стационарную наработку на отказ T_+ и среднее стационарное время восстановления T_- найдем, используя формулы [9,10]:

$$T_+ = \frac{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}{\int_{E_+} P(e, E_-) \rho(de)}, \quad T_- = \frac{\int_{E_-} m(e) \rho(de)}{\int_{E_-} P(e, E_-) \rho(de)}, \quad (7)$$

где $\rho(de)$ – стационарное распределение ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$; $m(e)$ – средние времена пребывания в состояниях системы; $P(e, E_-)$ – вероятности переходов ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ из работоспособных состояний в отказовые.

Используя формулы (1), определим средние значения времен пребывания в состояниях:

$$m(111) = \int_0^{\infty} \bar{F}(t) \bar{R}(t) dt, \quad m(211x) = \int_0^x \bar{R}(t) dt, \quad m(2\hat{1}0x) = M\gamma, \\ m(\tilde{2}2) = M\beta, \quad m(101x) = x, \quad m(2\hat{0}0) = M\gamma, \quad m(222) = M\beta. \quad (8)$$

С учетом формул (3), (5) и (8), найдем выражения, входящие в (7).

$$\int_{E_+} m(e) \rho(de) = m(111) \rho(111) + \int_{\mu}^{\infty} m(211x) \rho(211x) dx = \\ = \rho_0 \left(\int_0^{\infty} \bar{F}(t) \bar{R}(t) dt + \int_{\mu}^{\infty} dx \int_0^x \bar{R}(t) dt \int_x^{\infty} h_r(y-x) f(y) dy \right). \quad (9)$$

Выполнив необходимые преобразования выражения (9), получим:

$$\int_{E_+} m(e) \rho(de) = \rho_0 \left(M\alpha + \int_0^{\mu} \bar{R}(t) dt \int_0^{\infty} \bar{F}(y+\mu) dH_r(y) - \int_0^{\mu} \bar{R}(t) dt \int_0^{\infty} \bar{F}(y+t) dH_r(y) \right). \quad (10)$$

Далее,

$$\int_{E_-} m(e) \rho(de) = m(\tilde{2}2) \rho(\tilde{2}2) + m(2\hat{0}0) \rho(2\hat{0}0) + m(222) \rho(222) +$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^{\infty} m(2\hat{1}0x)\rho(2\hat{1}0x)dx + \int_0^{\infty} m(101x)\rho(101x)dx = \\
& = M\beta \left(\rho_0 \int_0^{\infty} f(t)R(t)dt - \rho_0 \int_{\mu}^{\infty} f(t)R(t-\mu)dt + \rho_0 \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t h_r(t-y)(R(y)-R(y-\mu))dy \right) + \\
& + M\gamma \left(\rho_0 \int_0^{\infty} f(t)\bar{R}(t)dt + \rho_0 \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t h_r(t-y)\bar{R}(y)dy \right) + \\
& + M\beta \left(\rho_0 \int_0^{\infty} f(t)\bar{R}(t)dt + \rho_0 \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t h_r(t-y)\bar{R}(y)dy \right) + \\
& + \rho_0 M\gamma \left(\int_0^{\mu} dx \int_0^{\infty} f(x+t)r(t)dt + \int_0^{\mu} dx \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t h_r(t-y)r(y-x)dy + \right. \\
& \quad \left. + \int_{\mu}^{\infty} dx \int_x^{\infty} h_r(y-x)f(y)dy \right) + \\
& + \rho_0 \int_0^{\infty} xdx \int_0^{\infty} r(x+t)f(t)dt + \rho_0 \int_0^{\infty} xdx \int_{\mu}^{\infty} f(t)dt \int_{\mu}^t r(x+y)h_r(t-y)dy.
\end{aligned} \tag{11}$$

Выполнив необходимые преобразования выражения (11), получим:

$$\begin{aligned}
& \int_{E_-} m(e)\rho(de) = \rho_0 M\beta + \rho_0 (M\gamma + M\delta) \int_0^{\infty} \bar{F}(t+\mu)d\hat{H}_r(t) + \\
& - \rho_0 \int_0^{\mu} \bar{R}(x)dx \int_0^{\infty} \bar{F}(t+\mu)dH_r(t) - \rho_0 M\alpha + \rho_0 \int_0^{\mu} \bar{R}(x)dx \int_0^{\infty} \bar{F}(t+x)dH_r(t),
\end{aligned} \tag{12}$$

где,

$$\hat{H}_r(t) = \begin{cases} 1 + H_r(t), & t > 0, \\ 0, & t = 0, \end{cases}, \quad H_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} R^{*(n)}(t) \quad - \text{ функция восстановления}$$

процесса восстановления, порожденного СВ δ , $R^{*(n)}(t)$ – n-кратная свертка ФР $R(t)$.

Тогда,

$$\int_E m(e)\rho(de) = \rho_0 \left(M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^{\infty} \bar{F}(t+\mu)d\hat{H}_r(t) \right). \tag{13}$$

Далее,

$$\int_{E_+} P(e, E_-)\rho(de) = P(111, E_-)\rho(111) + \int_0^{\infty} P(211x, E_-)\rho(211x)dx =$$

$$= \rho_0 \left(\int_0^{\infty} dx \int_0^{\infty} f(x+t)r(t)dt + \int_0^{\infty} dx \int_0^{\infty} r(x+t)f(t)dt + \right. \\ \left. + \int_{\mu}^{\infty} dx \int_x^{\infty} h_r(t-x)f(t)dt \int_0^x r(x-y)dy + \int_{\mu}^{\infty} dx \int_x^{\infty} h_r(t-x)f(t)dt \int_0^{\infty} r(x+y)dy \right). \quad (14)$$

Выполнив необходимые преобразования выражения (14), получим:

$$\int_{E_+} P(e, E_-) \rho(de) = \rho_0 \int_0^{\infty} \bar{F}(t + \mu) d\hat{H}_r(t). \quad (15)$$

Таким образом, с учетом формул (10), (15), средняя стационарная наработка на отказ T_+ имеет вид:

$$T_+ = \frac{M\alpha + \int_0^{\mu} \bar{R}(t)dt \int_0^{\infty} \bar{F}(y + \mu) dH_r(y) - \int_0^{\mu} \bar{R}(t)dt \int_0^{\infty} \bar{F}(y + t) dH_r(y)}{\int_0^{\infty} \bar{F}(y + \mu) d\hat{H}_r(y)}, \quad (16)$$

среднее стационарное время восстановления T_- , с учетом формул (13), (15), определяется формулой:

$$T_- = \left(M\beta - M\alpha + (M\gamma + M\delta) \int_0^{\infty} \bar{F}(t + \mu) d\hat{H}_r(t) + \right. \\ \left. + \int_0^{\mu} \bar{R}(x)dx \int_0^{\infty} \bar{F}(t + x) dH_r(t) - \int_0^{\mu} \bar{R}(x)dx \int_0^{\infty} \bar{F}(t + \mu) dH_r(t) \right) / \int_0^{\infty} \bar{F}(t + \mu) d\hat{H}_r(t). \quad (17)$$

Отметим, что стационарные характеристики стационарный коэффициент готовности K_2 , средняя стационарная наработка на отказ T_+ , среднее стационарное время восстановления T_- , связаны соотношением:

$$K_2 = \frac{T_+}{T_+ + T_-}. \quad (18)$$

Тогда, стационарный коэффициент готовности найдем, применяя формулу (18):

$$K_2 = \frac{M\alpha + \int_0^{\mu} \bar{R}(t)dt \int_0^{\infty} \bar{F}(y + \mu) dH_r(y) - \int_0^{\mu} \bar{R}(t)dt \int_0^{\infty} \bar{F}(y + t) dH_r(y)}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^{\infty} \bar{F}(t + \mu) d\hat{H}_r(t)}. \quad (19)$$

Перейдем к нахождению стационарных характеристик эффективности данной системы: S – средней удельной прибыли системы в единицу календарного времени и C – средних удельных затрат системы в единицу времени исправного функционирования системы. Для их определения воспользуемся формулами [6]:

$$S = \frac{\int_E m(e) f_s(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)}, \quad C = \frac{\int_{E_+} m(e) f_c(e) \rho(de)}{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}, \quad (20)$$

где $f_s(e)$, $f_c(e)$ – функции, определяющие соответственно доход и затраты в единицу времени в каждом состоянии. Пусть c_1 – прибыль, получаемая в единицу времени работоспособного состояния системы; c_2 – потери от отказа системы в единицу времени.

Для данной системы функции $f_s(e)$, $f_c(e)$ имеют следующий вид:

$$f_s(e) = \begin{cases} c_1, & e \in \{111, 211x\}, \\ -c_2, & e \in \{2\hat{1}0x, 2\tilde{2}2, 101x, 2\hat{0}0, 222\}, \end{cases}$$

$$f_c(e) = \begin{cases} 0, & e \in \{111, 211x\}, \\ c_2, & e \in \{2\hat{1}0x, 2\tilde{2}2, 101x, 2\hat{0}0, 222\}. \end{cases} \quad (21)$$

С учетом формул (4), (6), (8), (21), средняя удельная прибыль в единицу календарного времени определяется соотношением:

$$S = \frac{(c_1 + c_2) \left(M\alpha + \int_0^\mu \bar{R}(t) dt \int_0^\infty \bar{F}(y + \mu) dH_r(y) - \int_0^\mu \bar{R}(t) dt \int_0^\infty \bar{F}(y + t) dH_r(y) \right)}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty \bar{F}(t + \mu) d\hat{H}_r(t)} - c_2. \quad (22)$$

Средние удельные затраты в единицу времени исправного функционирования имеют вид:

$$C = \frac{c_2 \left(M\beta + (M\gamma + M\delta) \int_0^\infty \bar{F}(t + \mu) d\hat{H}_r(t) \right)}{M\alpha + \int_0^\mu \bar{R}(t) dt \int_0^\infty \bar{F}(y + \mu) dH_r(y) - \int_0^\mu \bar{R}(t) dt \int_0^\infty \bar{F}(y + t) dH_r(y)} - c_2. \quad (23)$$

Заключение. Полученные формулы (16), (17), (19), (22), (23) позволяют вычислять значения средней стационарной наработки на отказ, среднего стационарного времени восстановления, стационарного коэффициента готовности, средней удельной прибыли и средних удельных затрат для различных исходных данных и решать задачи нахождения оптимального периода проведения упреждающего восстановления. В дальнейшем предполагается использовать данную методику для моделирования многокомпонентных систем с учетом упреждающего восстановления с иллюстрацией численных результатов на примерах из современной техники.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках основной части государственного

заказа (№ 1.10513.2018 / 11.12) и Российского фонда фундаментальных исследований (№ 19-01-00704а).

Библиографический список

1. Каштанов В.А. Полумарковские модели процесса технического обслуживания. – М.: Знание, 1987. – 92 с.
2. Каштанов В.А., Медведев А.И. Теория надёжности сложных систем (теория и практика). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 608 с.
3. Curry, G.L. Manufacturing Systems Modeling and Analysis, 2nd ed. / G.L. Curry, R.M. Feldman// – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. – 356 p.
4. Beichelt, F. Reliability and Maintenance: Networks and System / F. Beichelt, P. Tittmann // –CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. – 326 p.
5. Obzherin Yu.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures – USA.: Elsevier, Academic press, 2015. – 212 p.
6. Каштанов В.А. Оптимальные задачи технического обслуживания. – М.: Знание, 1981. – 122 с.
7. Grabski F. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. – Elsevier Science, 2015. – 270 p.
8. Jansen J. Semi-Markov Models and Applications – Academic Publishers, Netherlands: Kluwer, 1999. – 404 p.
9. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат [и др.]. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 276 с.
10. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – Киев: Наукова думка, 1982. – 236 с.
11. Королюк В.С. Стохастические модели систем. – Киев: Либідь, 1989. – 208 с.
12. Кантарович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1977. – 744 с.

Bibliograficheckiy spisok

1. Kashtanov V.A. Polumarkovskie modeli processa tekhnicheskogo obsluzhivaniya. – М.: Znanie, 1987. – 92 s.
2. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. Teoriya nadyozhnosti slozhnyh sistem (teoriya i praktika). – М.: FIZMATLIT, 2010. – 608 s.
3. Curry, G.L. Manufacturing Systems Modeling and Analysis, 2nd ed. / G.L. Curry, R.M. Feldman// – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. – 356 p.
4. Beichelt, F. Reliability and Maintenance: Networks and System / F. Beichelt, P. Tittmann // –CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. – 326 p.
5. Obzherin Yu.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures – USA.: Elsevier, Academic press, 2015. – 212 p.
6. Kashtanov V.A. Optimal'nye zadachi tekhnicheskogo obsluzhivaniya. – М.: Znanie, 1981. – 122 s.
7. Grabski F. Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. – Elsevier Science, 2015. – 270 p.
8. Jansen J. Semi-Markov Models and Applications – Academic Publishers, Netherlands: Kluwer, 1999. – 404 p.

9. Polumarkovskie modeli vosstanavlivaemyh sistem i sistem massovogo obsluzhivaniya / A.N. Korlat [i dr.]. – Kishinev: Shtiinca, 1991. – 276 s.
10. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 236 s.
11. Korolyuk V.S. Stohasticheskie modeli sistem. – Kiev: Libid', 1989. – 208 s.
12. Kantarovich L.V., Akilov G.P. Funkcional'nyj analiz. – M.: Nauka, 1977. – 744 s.

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

Бойко Елена Георгиевна, к.т.н., доцент, доцент, boiko_eg@ukr.net, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

Федоренко Сергей Николаевич, старший преподаватель, sergey.fedor@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

STATIONARY CHARACTERISTICS OF RELIABILITY AND EFFICIENCY OF TECHNICAL SYSTEM WITH PREEMPTIVE RECOVERY BY RESIDUAL OPERATION TIME

Y. E. Obzherin, E.G. Boyko, S. N. Fedorenko

One of the methods to improve the reliability and efficiency of technical systems is preemptive recovery, which allows to reduce the effects of system failures. The article discusses the semi-Markov model for monitoring latent failures of a technical system, taking into account preemptive recovery for the remaining time until the next latent failure. The stationary characteristics of the reliability and efficiency of the system are found. The results can be used to assess the effectiveness of the use of preemptive recovery.

Keywords: technical system, semi-Markov process, preemptive recovery, stationary characteristics

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

Boyko Elena Georgievna, candidate of technical sciences, docent, docent, boiko_eg@ukr.net, Russia, Sevastopol State University,

Fedorenko Sergey Nikolaevich, st. prep., sergey.fedor@mail.ru, Russia, Sevastopol State University.

УДК 62 - 822

МУЛЬТИСИЛЬФОННЫЕ ГИДРОВЫТЕСНИТЕЛИ ГИДРОПРИВОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Пашков Е.В.¹, Поливцев В.П.¹

Аннотация. Проанализированы функциональные возможности сильфонных (моносильфонных) и других типов гидровытеснителей, применяющихся в гидроприводах технологического промышленного оборудования при нормальных и высоких давлениях жидких рабочих сред. Обосновано создание и применение мультисильфонных гидровытеснителей, позволяющих уменьшить потери давления, обусловленные упругой осевой деформацией сильфонов, снижающие точность передачи давления одной жидкой среды другой. Приведена методика определения необходимого числа сильфонов в конструкции гидровытеснителя в зависимости от перепада давления в полости камеры технологического оборудования. Описаны конструкция и принцип работы гидровытеснителей с односторонним и двусторонним расположением сильфонов относительно разделителя сред.

Ключевые слова. Гидропривод, гидровытеснитель, сильфон, разделитель жидких сред.

Введение. Гидровытеснители относятся к гидравлическому оборудованию, а именно к объемным гидромашинам, и предназначены для передачи энергии одной жидкой (рабочей) среды другой жидкой (технологической) среде, которые отличаются по химическому составу или по физическим параметрам (плотность, текучесть, вязкость), без их соприкосновения между собой, например, в гидроприводах промышленного технологического оборудования со специальными объемными герметичными рабочими камерами с заданными величинами давления, обеспечивающего выполнение соответствующего технологического процесса.

В терминах ГОСТ, гидровытеснитель (пневмовытеснитель, пневмогидровытеснитель), это объемная гидромашинка, предназначенная для преобразования энергии одного потока рабочей среды в энергию другого потока без изменения значения давления, т.е. давление на входе p_1 равно давлению на выходе p_2 [1].

Известны конструкции пневмогидровытеснителей (гидровытеснителей) с жесткими или упругими (гибкими) разделителями рабочих и технологических сред, функции которых выполняют соответственно плунжеры, поршни, мембраны и сильфоны [2, 3, 4].

Плунжерные (поршневые) гидровытеснители (Рис.1,а), содержащие корпус 3 с крышкой 1, не обеспечивают надежную герметизацию впускной 2 и выпускной 5 полостей, а следовательно надежное разделение рабочей и технологической сред, которые при высоких давлениях могут перетекать из

полости в полость через гарантированный зазор между плунжером (поршнем) 4 и поверхностью полости корпуса.

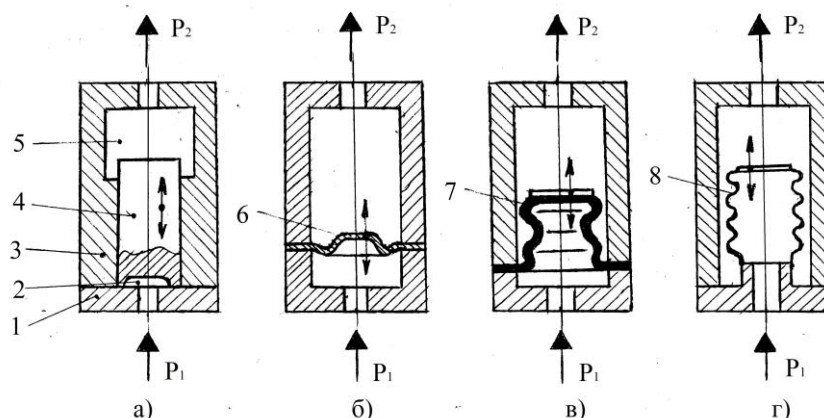


Рис.1 – Схемы гидровытеснителей: плунжерного (поршневого) (а), мембранных (б, в), сифонного (моносифонного) (г)

Гидровытеснители с гофрированными металлическими мембранами 6 (**Рис.1,б**) или плоскими эластичными мембранами, допускающими весьма незначительные по величине прогибы, не обеспечивают значительные объемы вытесняемой технологической жидкой среды, т.е. имеют низкие технологические возможности.

Существенным недостатком гидровытеснителя с фигурной (чулочной) мембраной (**Рис.1,в**) следует считать отсутствие в его составе конструктивного элемента, обеспечивающего как возврат фигурной мембраны в исходное положение, так и возврат в выпускную полость вытесненного объема технологической жидкой среды, без чего невозможно повторить цикл вытеснения. Кроме того, гидровытеснитель такой конструкции нельзя применять в гидроприводах с высоким давлением рабочей и технологической среды (свыше 10 МПа), так как обладающий высокой текучестью эластичный материал мембраны, края которой используются для уплотнения стыка между корпусом и крышкой, не может обеспечить надежную герметизацию полостей и устранить утечки (перетечки) жидких сред, поскольку при их соединении, а также под действием высокого давления, этот материал будет выдавливаться из открытого в сторону полостей или наружу зазора. По причине изготовления эластичной мембраны из резины или упругого полимера их также нельзя использовать для разделения химически агрессивных, например, кислотных сред и при высоких температурах, способных вызвать разрушение мембран или потерю их механических свойств, т.е. снижение надежности.

В конструкциях сифонных (моносифонных) гидровытеснителей (**Рис.1,г**) используются однослойные сифоны с максимально возможным диаметром 196 мм и сифоны многослойные с максимальным диаметром 190 мм [5, 6]. Осевая жесткость сифона 8, представляющего собой цилиндрическую упругую гофрированную оболочку, зависит от его диаметра и определяет чувствительность гидровытеснителя, т.е. способность обеспечить

высокую точность преобразования энергии с учетом потерь на осевую деформацию (растяжение или сжатие), которые растут с увеличением диаметра. Возврат сильфона в исходное состояние после отключения давления p_1 обеспечивается за счет накопленной в нем при растяжении (сжатии) энергии упругой деформации.

Результаты. Уменьшение потерь энергии потока рабочей среды с целью обеспечения требуемой точности ее преобразования в энергию технологической среды, достигается с помощью мультисильфонных гидровытеснителей, конструкция которых характеризуется наличием нескольких сильфонов.

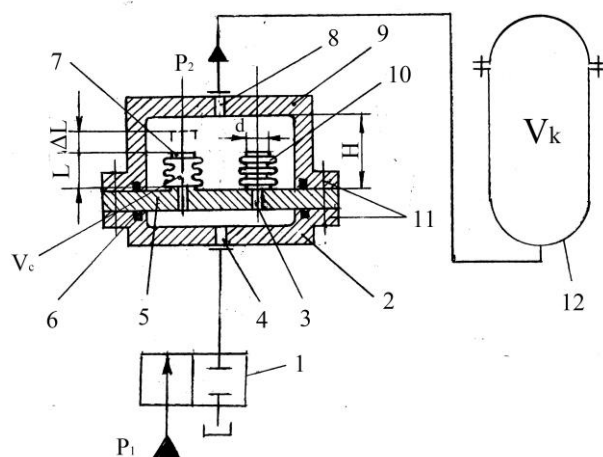


Рис.2 – Мультисильфонный гидровытеснитель с односторонним расположением сильфонов относительно разделителя сред

Мультисильфонный гидровытеснитель (Рис.2), характеризующийся односторонним расположением в одной горизонтальной плоскости сильфонов относительно разделителя сред, выполнен на базе сборного корпуса, состоящего из двух цилиндрических чашек 2 и 9 с соединительными фланцами 11 по краям, соосно и оппозитно расположенными относительно друг друга донными частями наружу, и образующими с размещенным между ними разделителем рабочих сред в виде диска 5 соответственно впускную герметичную полость, соединенную отверстием 4 и магистральным трубопроводом для подвода рабочей среды давлением p_1 с отсечным клапаном 1, и выпускную герметичную полость, соединенную с помощью отверстия 8 и трубопровода для отвода вытесненной технологической среды давлением p_2 с камерой 12. Размер выпускной полости в осевом направлении H принимается равным сумме величин максимально допустимой деформации сильфона и его длины в свободном состоянии, что исключает перерастание упругих деформаций в пластические, вызывающие повреждения сильфонов.

К диску со стороны выпускной полости прикреплены расположенные в одной горизонтальной плоскости одинаковые по размерам сильфоны 10, образующие вместе с ним сильфонный узел. Отверстия свободных концов сильфонов закупорены с помощью сварки пробками в виде дисков 7.

Образованные таким образом внутренние герметичные полости сильфонов соединены отверстиями 3 с впускной герметичной полостью корпуса гидровытеснителя. Герметизация полостей обеспечивается кольцевыми уплотнениями 6, установленными в кольцевых канавках на обращенных к диску торцовых поверхностях чашек, причем канавки для предохранения колец от выдавливания в уплотняемые зазоры выполнены закрытыми в радиальных направлениях.

В качестве потребителя вытесненной технологической среды используется, например, герметичная камера 12, входящая в состав технологического оборудования.

Работает гидровытеснитель следующим образом.

Перед началом выполнения цикла вытеснения впускная и выпускная полости, а также полость камеры 12 обезвоздушены и заполнены полностью соответствующими жидкими средами с одинаковым давлением.

При подаче через отверстие 4 во впускную полость рабочей жидкой среды, соединенные с ней отверстиями 3 полости сильфонов 10, имеющих в свободном состоянии длину L , заполняются, вызывая растяжение (удлинение, ход) сильфонов в осевом направлении на величину ΔL , и осуществляют вытеснение из выпускной полости части находящейся в ней технологической жидкой среды под давлением $p_2 = p_1$ в полость камеры 12, объем (расход) которой зависит от диаметра сильфонов d и величины удлинения (хода) ΔL (величина допустимых деформаций металлических сильфонов составляет 5...15% от их длины L в свободном состоянии [2]). Отсутствие перепада давлений в полостях исключает деформацию (раздутие, сжатие) сильфонов в радиальном направлении.

При отключении подачи рабочей среды во впускную полость сильфоны сжимаются (укорачиваются) в осевом направлении под действием накопленной в них при растяжении энергии упругой деформации, возвращаясь тем самым в исходное свободное состояние и создавая в выпускной полости разрежение, т.е. падение давления находящейся в ней технологической среды, вызывающее всасывание в нее из камеры 12 технологической среды, объем которой равен вытесненному ранее объему.

Количество сильфонов в составе гидровытеснителя в зависимости от перепада давления технологической жидкой среды в камере объемом V_k и выбранных размерных параметров сильфонов определяется следующим образом.

Коэффициент сжатия находящейся в камере технологической жидкой среды [7]

$$\beta = (\Delta V_k / V_k) \Delta p,$$

где ΔV_k – изменение объема жидкой технологической среды в камере;

Δp – изменение (перепад) давления технологической среды в камере, откуда

$$\Delta V_k = V_k \Delta p \beta.$$

(Примечание: для воды $\beta = 47,5 \times 10^{11} \text{ 1/Па}$).

Объем жидкой технологической среды, вытесняемой одним сильфоном, диаметром d и длиной L в свободном состоянии, при рабочем ходе $\Delta L = 0,1 L$, что составляет 10% от его длины в свободном состоянии,

$$\Delta V_c = (\pi d^2 / 4) \Delta L = 0,1 (\pi d^2 / 4) L.$$

Из вышеизложенного следует, что необходимое число сильфонов

$$n = \Delta V_k / \Delta V_c = (12,7 \beta V_k \Delta p) / (d^2 L).$$

Полученное значение n следует округлить до целого числа в сторону увеличения.

Диаметр чашек представленного на **Рис.2** гидровытеснителя зависит от числа сильфонов, увеличение которого приводит к увеличению диаметра. С целью сохранения прочности чашек в условиях высокого внутреннего давления необходимо увеличивать толщину их стенок, что приводит к повышению металлоемкости [8].

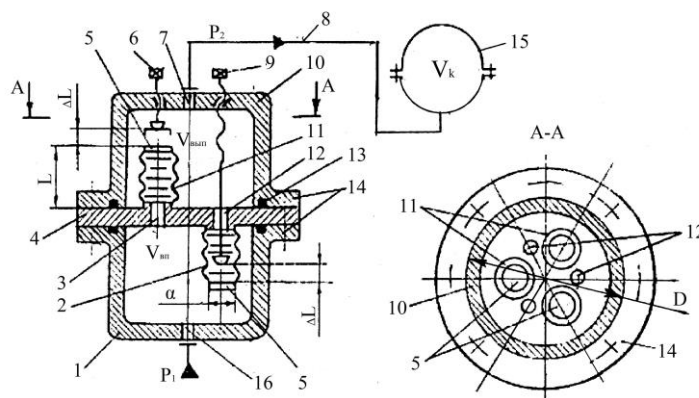


Рис.3 – Мультисильфонный гидровытеснитель с двусторонним расположением сильфонов относительно разделителя сред

Представленный на **Рис.3** мультисильфонный гидровытеснитель, характеризующийся двусторонним расположением сильфонов относительно разделителя сред, состоит из двух цилиндрических чашек 1 и 10 с соединительными фланцами 14 по краям, соосно и оппозитно расположенными относительно друг друга донными частями наружу, и образующими с размещенным между ними разделителем рабочих сред в виде диска 4 соответственно впускную объемом $V_{вп}$ и выпускную объемом $V_{вып}$ герметичные полости.

Впускная полость соединена с помощью отверстия 16 с источником давления p_1 рабочей среды, а выпускная полость с технологической средой, находящейся под давлением p_2 , соединена с помощью отверстия 7, трубопровода 8 с полостью сосуда – потребителя (камеры) высокого давления 15, объемом V_k .

К разделительному диску с двух торцовых сторон, т.е. со стороны выпускной и впускной полости, прикреплены с помощью отверстий одних из своих концов соответственно сильфоны 11 и 2 длиной L и диаметром d , а отверстия их других, свободных концов закупорены с помощью сварки

пробками 5 в виде дисков. Образованные таким образом внутренние герметичные полости сильфонов соединены соответственно отверстиями 3 и 12 с впускной и выпускной герметичной полостью корпуса гидровытеснителя.

Сильфоны прикреплены к диску со стороны выпускной и впускной полостей с возможностью упругого осевого растяжения и сжатия ΔL , соответственно.

Величина осевого перемещения в пределах упругой деформации свободных концов работающих на растяжение сильфонов регулируется винтовыми упорами 6, а сильфонов, работающих на сжатие, винтовыми упорами 9, установленными в донной части чашки с выпускной полостью, причем последние взаимодействуют с пробками через отверстия в диске и полости соответствующих сильфонов.

Герметизация полостей корпуса обеспечивается кольцевыми уплотнениями 13, установленными в кольцевых канавках на обращенных к разделительному диску торцовых поверхностях фланцев чашек, причем канавки для предотвращения выдавливания колец в уплотняемые зазоры выполнены закрытыми в радиальных направлениях.

Перед началом выполнения цикла вытеснения, из впускной и выпускной полости, а также из полости потребителя – камеры 15 удаляется воздух и они заполняются полностью соответствующими жидкими средами под одинаковым давлением.

При подаче во впускную полость рабочей жидкой среды под давлением p_1 , соединенные с ней отверстиями 3 полости сильфонов 11, имеющих в свободном состоянии длину L , заполняются, что вызывает их растяжение (удлинение) в осевом направлении на величину ΔL , а сильфоны 2, полости которых соединены отверстиями 12 с выпускной полостью и заполнены находящейся в ней технологической средой, сжимаются в осевом направлении на величину ΔL и осуществляют вытеснение из выпускной полости корпуса части находящейся в ней технологической среды под давлением $p_2 = p_1$ в полость потребителя 15 объемом V_k .

Отсутствие перепада давлений в полостях корпуса и сильфонов исключает деформацию последних в радиальном направлении.

При отключении подачи рабочей среды во впускную полость корпуса сильфоны 11 сжимаются, а сильфоны 2 растягиваются в осевом направлении под действием давления поступающей в выпускную полость из полости потребителя технологической среды, а также под действием накопленной в них при растяжении и сжатии энергии упругой деформации, возвращаясь тем самым в исходное свободное состояние и создавая в выпускной полости разрежение, т.е. падение давления находящейся в ней технологической среды, вызывающее всасывание в нее из полости камеры 15 технологической среды в объеме, равном вытесненному ранее объему. При этом, упругий возврат сильфонов в исходное состояние способствует ускоренному вытеснению рабочей среды из впускной полости.

Двустороннее расположение сильфонов не приводит к необходимости увеличивать наружный диаметр D корпуса и толщину его стенок, а

следовательно, способствует обеспечению требуемых прочностных характеристик без повышения металлоемкости и увеличения габаритов.

Заключение. Применение в конструкциях моноцилиндровых гидравлических гидравлических взамен одного цилиндра нескольких цилиндров меньшего диаметра с такой же суммарной площадью поперечного сечения, но имеющих меньшую жесткость в осевом направлении, а следовательно, более высокую чувствительность, позволяет уменьшить потери энергии потока рабочей жидкой среды, затрачиваемой на их деформацию, и осуществить преобразование этой энергии в энергию потока технологической жидкой среды с большей точностью.

Библиографический список

- 1.ГОСТ 17752 – 81 (СТ СЭВ 2455 – 80). Гидропривод объемный и пневмопривод. Термины и определения (с Изменениями №1,2).
- 2.Пневматические устройства и системы в машиностроении: Справочник / Е.В.Герц, А.И.Кудрявцев, О.В.Ложкин и др. Под общ. ред. Е.В.Герц. – М.: Машиностроение, 1981. – С.64, глава 3, раздел 3.1. Пневмодвигатели .
- 3.Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2008. – 640с.
- 4.Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта [и др.]. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
- 5.ГОСТ 22388 – 90. Цилиндры однослойные.
- 6.ГОСТ 21744 – 83. Цилиндры многослойные металлические.
- 7.Вильнер, Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Вильнер, Я.Г. Ковалев, Б.Б. Некрасов. Под ред. Б.Б.Некрасова. Минск, Высшаяш. Школа, 1976. – С.12, раздел 1.2 .
- 8.Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 344 с.

Bibliograficheskiy spisok

- 1.GOST 17752 – 81 (ST SEV 2455 – 80). Hidroprivod ob"emnyj i pnevmoprivod. Terminy i opredeleniya (s Izmeneniyami №1,2).
- 2.Pnevmaticheskie ustrojstva i sistemy v mashinostroenii: Spravochnik / E.V.Gerc, A.I.Kudryavcev, O.V.Lozhkin i dr. Pod obshch. red. E.V.Gerc. – M.: Mashinostroenie, 1981. – S.64, glava 3, razdel 3.1. Pnevmodvighiteli .
- 3.Sveshnikov V.K. Stanochnye gidroprivody: spravochnik – 5-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 640s.
- 4.Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: uchebnik dlya mashinostroitel'nyh vuzov / T.M. Bashta [i dr.]. – 2-e izd., pererab. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 423 s.
- 5.GOST 22388 – 90. Sil'fony odnoslojnye.
- 6.GOST 21744 – 83. Sil'fony mnogoslojnye metallicheskie.
- 7.Vil'ner, YA.M. Spravochnoe posobie po gidravlike, gidromashinam i gidroprivodam / YA.M. Vil'ner, YA.G. Kovalev, B.B. Nekrasov. Pod red. B.B.Nekrasova. Minsk, Vyshyaysh. SHkola, 1976. – S.12, razdel 1.2 .

8.Lizin V.T., Pyatkin V.A. Proektirovanie tonkostennyh konstrukcij. 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 344 s.

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

Поливцев Виктор Петрович, к.т.н., доцент, кафедра «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», polivcev.viktor@yandex.ru , Россия, Севастопольский государственный университет

MULTISILPHONE HYDRAULIC COMPONENTS OF HYDRAULIC DRIVES OF INDUSTRIAL TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Pashkov E.V., Polivtsev V.P.

The functional capabilities of bellows (mono-bellows) and other types of hydraulic propellants used in hydraulic actuators of technological industrial equipment at normal and high pressures of liquid working media are analyzed. The creation and use of multisillon hydraulic jacks, justifying the reduction of pressure losses due to elastic axial deformation of the syphons, reducing the accuracy of pressure transfer from one liquid medium to another has been substantiated. A method for determining the required number of bellows in the design of a hydraulic propellant depending on the pressure drop across the chamber of the process equipment is given. The design and principle of operation of hydraulic piers with one-sided and two-sided positioning of the bellows relative to the media separator are described.

Keywords: hydraulic actuator, hydraulic mixer, bellows, separator for liquid media.

Pashkov Yevgeny Valentinovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Testing Systems and Automation of Technological Processes”, pashkov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

Polivtsev Viktor Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department “Instrument Systems and Technological Process Automation”, polivcev.viktor@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №3(7) 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.