

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Центр инженерных технологий и моделирования
«Экспонента»

V ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОТЛАДКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

27–28 марта 2018 г.



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 8

УДК 681.518(04)
ББК 31.15
Т38

**Технологии разработки и отладки сложных технических систем :
Т38 V Всероссийская научно-техническая конференция** : сборник материалов / Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента». Москва, 27–28 марта 2018 г. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 132, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5071-8

В сборник включены доклады, представленные на V Всероссийской научно-практической конференции «Технология разработки и отладки сложных технических систем», которая состоялась в марте 2018 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Структура сборника отражает тематическую направленность конференции.

Тексты докладов размещены в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

УДК 681.518(04)
ББК 31.15

ISBN 978-5-7038-5071-8

© ООО ЦИТМ «Экспонента», 2018
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018

УДК 681.527

Проектирование виртуальных лабораторных электромеханических стендов

©	Бошляков Андрей Анатольевич	boshlyakov@mail.ru
	Вельтищев Виталий Викторович	wwwwelt@mail.ru
	Зубков Антон Юрьевич	anton_zubkov@mail.ru
	Пахомов Тимофей Константинович	tpaxomov@list.ru
	Перминова Елена Александровна	perminovaea1@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана Москва, 105005, Россия

На примере стенда по экспериментальному определению КПД многоступенчатого цилиндрического редуктора показана последовательность применения программных средств, обеспечивающих разработку виртуального лабораторного комплекса с высокой степенью детализации оборудования. Для наглядной демонстрации работы этого компьютерного лабораторного стенда создана его управляемая 3D-модель, позволяющая визуально контролировать работу подвижных частей стенда в удобных для анализа ракурсах. Созданная в процессе работы программа может использоваться на вычислительном оборудовании с низкими системными характеристиками и является простой в установке и освоении.

Ключевые слова: механическая передача, графический движок, 3D-визуализация, моделирование, электромеханический модуль

Введение. На сегодняшний день для высшего инженерного образования в Российской Федерации остается актуальной проблема технического обеспечения учебных учреждений лабораторным оборудованием, работа с которым поспособствует лучшему освоению и пониманию студентами образовательной программы. В связи с повсеместным внедрением компьютерной техники стало возможным применение в образовательном процессе специального программного обеспечения, позволяющего заменить уникальное, но изношенное оборудование виртуальными 3D-моделями, при этом сохранив наглядность и реалистичность проводимых работ.

Под виртуальной лабораторией следует понимать программный комплекс, позволяющий проводить эксперименты при полном отсутствии реального лабораторного стенда. Разработка методики, по которой специалисты любого учебного заведения могли бы создавать виртуальные лабораторные стенды для собственных образовательных программ с использованием доступных средств проектирования, на сегодняшний день особенно актуальна. Замещение реального оборудования виртуальным позволит забыть об обслуживании и ремонте, будет способствовать фундаментализации высшего технического образования благодаря не только сохранению базовых компьютерных технологий, но и внедрению новых.

К преимуществам использования виртуальных лабораторий следует отнести интерактивность, отсутствие локализации, возможность моделирования, возможность выполнять задания удаленно. В качестве недостатков можно отметить отсутствие базы реальных исследований и предметной наглядности.

Разработка виртуальных лабораторных комплексов является одной из наиболее приоритетных задач в развитии современного образования не только в России, но и в мире. Именно по этой причине данная проблема находится под пристальным вниманием и входит в сферу стратегических интересов ведущих производителей, компаний и научных сообществ. В качестве примера следует отметить такой пакет программного обеспечения, как Software Tools for Academics and Researchers (STAR). Данная программа разработана в Массачусетском технологическом институте и предназначена для разработки виртуальных лабораторий для целей исследований и обучения. Система STAR отличается фундаментальностью и богатым инструментарием, одним из ее недостатков является узконаправленная специализация в области биохимии, генетики и биологии.

Анализ разработок в этой области позволяет утверждать, что чаще всего виртуальные лабораторные комплексы создают с использованием программ LabVIEW и Labwork, которые интегрируют с другим программным обеспечением (ПО): MATLAB, Multisim и т. п. Подобное широкое использование данного ПО при проектировании виртуального лабораторного оборудования в первую очередь продиктовано лояльным пользовательским интерфейсом.

К сожалению, LabVIEW и Labwork, так же как и STAR, требуют значительных вычислительных ресурсов, что при требовании высокой детализации делает применение этих программ затруднительным на вычислительном оборудовании с низкими системными характеристиками.

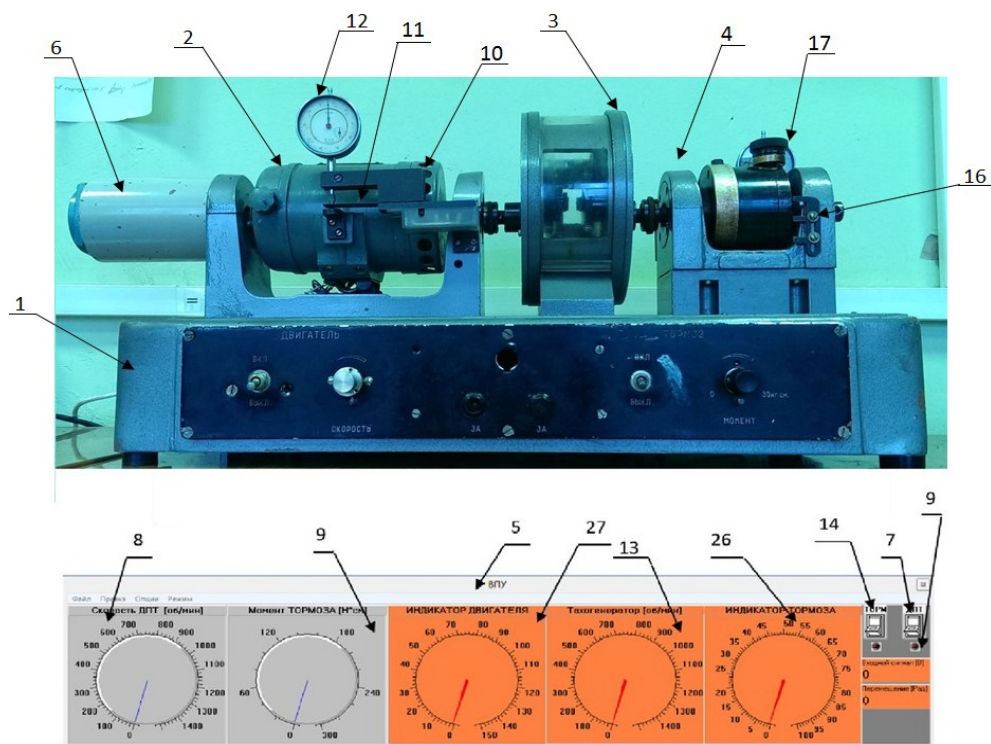


Рис. 1. Реальный стенд цилиндрической передачи

С учетом существующего ряда недостатков при МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках программы по замещению изношенных лабораторных стендов на кафедре РЛ5 («Элементы приборных устройств») была опробована новая методика проектирования виртуальных лабораторных комплексов [1]. Реальные стенды (рис. 1) находились в эксплуатации долгое время и требовали частого обслуживания. Была поставлена задача создать компьютерную модель реальной лабораторной установки и на ее основе разработать комплексную мультимедийную программу для имитации процесса проведения лабораторных работ при максимальном использовании отечественных или открытых программных продуктов, обеспечив высокую детализацию модулей виртуального стенда [2].

Анализ работы реального оборудования. Реальный лабораторный стенд состоит из основания 1, на которое установлены электрический двигатель 2, порошковая муфта 4, создающая момент нагрузки, и цилиндрический шестиступенчатый редуктор 3. Данная система регулируется с помощью пульты управления 5. Включение двигателя осуществляется тумблером 7, регулирование скорости вращения происходит путем поворота ручки потенциометра 8. Корпус электрического двигателя установлен на поворачивающейся раме 10.

Специальным выступом 23 двигатель упирается в плоскую пружину 11. При работе двигателя на статор действует реактивный крутящий момент, уравновешиваемый противодействующим моментом ротора, который возникает только при воздействии нагрузки. Изгиб пружины 11 вызывает перемещение ножки индикатора 12, фиксирующего число делений для последующего вычисления момента электрического двигателя. Статор в этом случае заставляет поворачиваться корпус двигателя в раме 10 на небольшой угол (пропорциональный реактивному крутящему моменту). Поскольку плечо действующей на пружину 11 силы практически не меняется, шкала индикатора градуируется по моменту.

Измерение моментов электродвигателя и нагрузки происходит следующим образом: электродвигатель 2 установлен в поворотной раме 10. В специальное отверстие в раме вставляется рычаг 20. На рычаг помещается груз 21, перемещаемый вдоль него и создающий момент для градуировки шкалы индикатора 12.

Работа с устройством задания и измерения момента нагрузки на выходном валу осуществляется по такому же алгоритму, как и с устройством измерения момента электродвигателя (рис. 2). От вала электрического двигателя через соединительную муфту 13 вращение передается на входной вал исследуемого многоступенчатого редуктора 3. От выходного вала редуктора через упругую муфту, аналогичную муфте 13, движение передается на нагрузку в виде порошковой муфты 4. Порошковая муфта 4 состоит из статора и ротора в виде полого цилиндра, а зазор между ними заполнен жидкой смесью ферритового порошка и масла. Статор порошкового тормоза снабжен обмоткой, через которую пропускается электрический ток. Изменение тока в обмотке приводит к изменению магнитного поля в зазоре и связанной с ним вязкостью жидкой смеси ферритового порошка и масла.

Регулируя ток в обмотке статора поворотом ручки 15, изменяют вязкость жидкости, и соответственно включают и выключают момент нагрузки порошковой муфты 4 с помощью тумблера 14. Градуировка осуществляется при выключенном двигателе и тормозе.

В качестве примера рассмотрим процесс градуировки измерительной пружины 11 и индикатора 12. Для этого малый рычаг 20 до упора вставляется в отверстие, находящееся сзади рамы двигателя. На рычаг 20 устанавливается градуировочный

груз 21. Стрелку индикатора 12 поворотом шкалы нужно установить на ноль. Упор рамы статора двигателя 2 прижимается к плоской измерительной пружине 11. Винтовая люфтовывбирающая пружина 22 под воздействием заранее подобранной силы прижатия выбирает зазор между пружиной 11 и упором. Переместив градуировочный груз 21 вдоль шкалы рычага 20, нужно выставить грань груза напротив рисок, соответствующих изменению длины плеча Δl_j на 8...20 см. При этом момент, действующий на статор двигателя, постепенно возрастает, вызывая увеличение прогиба пружины 11 и перемещение стрелки индикатора 12. Изменение момента на ΔM_{mj} , создаваемое перемещением градуировочного груза на Δl_j , уравнивается изменением силы прижатия измерительной пружины 11 (1). Последовательность градуировки измерительной пружины 16 и индикатора 17 аналогична.

Общий вид стенда, разработанного в Irrlicht, показан на рис. 3.

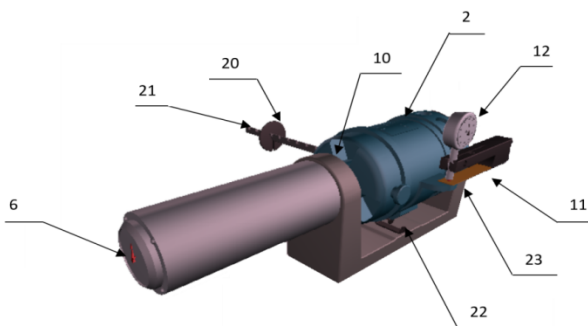


Рис. 2. Устройство измерения момента двигателя и скорости

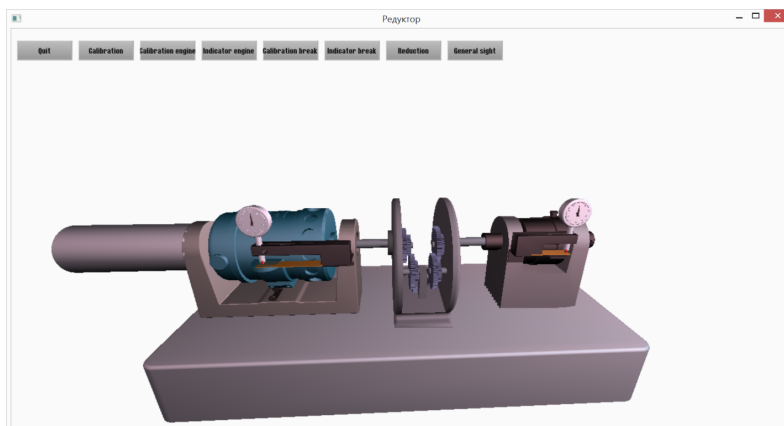


Рис. 3. Виртуальный стенд цилиндрической передачи в Irrlicht

При проведении лабораторной работы все получаемые значения заносят в таблицу (рис. 4). Момент на ΔM_{mj} пропорционален отклонению стрелки индикатора [3, 4]:

$$\Delta M_{mj} = F_m \Delta l_j = K_{ij} v_j, \quad (1)$$

где K_{ij} — значение градуировочного коэффициента индикатора 12/17.

Градуировка осуществляется с помощью специальной интерактивной таблицы, в которую студент заносит необходимые значения индикаторов момента (см. рис. 4).

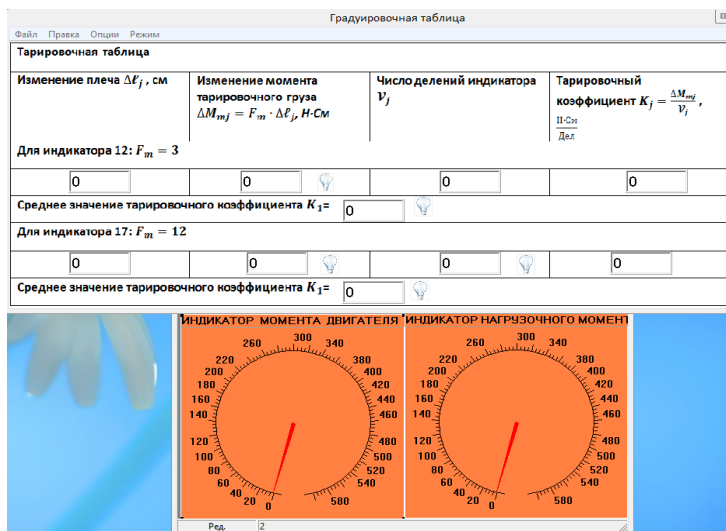


Рис. 4. Градуировочная таблица и индикаторы моментов

Взаимодействие с виртуальным стендом осуществляется с помощью специального пульта (рис. 5), на котором размещены элементы управления и наблюдения за показаниями соответствующих значений (тахометр, датчик момента двигателя, датчик момента тормоза).

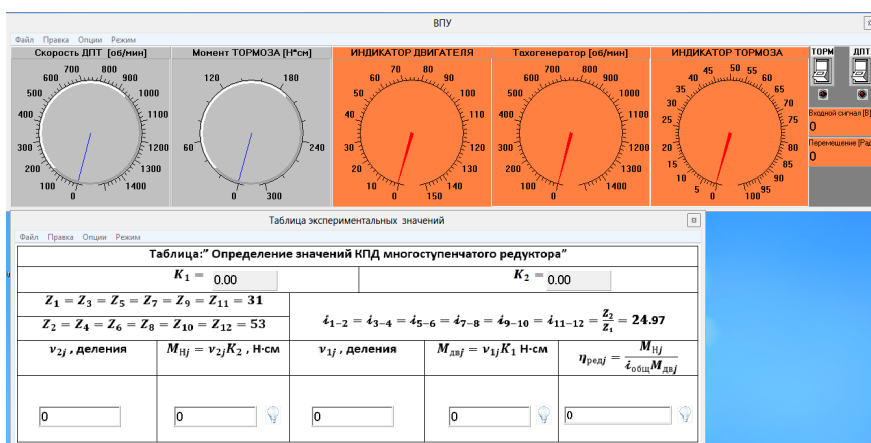


Рис. 5. Виртуальный пульт управления

Последовательно рассмотрим этапы предложенной нами методики проектирования виртуальных лабораторных комплексов на примере электромеханического стенда многоступенчатого цилиндрического редуктора.

Методика проектирования виртуальной лабораторной установки. Для реализации виртуального стенда было решено использовать 3D-модели, построенные в программных пакетах SolidWorks и Autodesk 3ds Max. Программа SolidWorks [5] используется для создания конструкторской документации и разработки на ее основе 3D-модели (см. рис. 2), которая позже с использованием среды Autodesk 3ds Max переносится для использования в графический движок Irrlicht Engine.

Autodesk 3ds Max используется в качестве программы, преобразующей 3D-модели объектов, полученных в SolidWorks. Здесь над 3D-моделями осуществляются следующие действия:

- задаются начальные координаты, которые впоследствии используются для работы в Irrlicht;
- происходит ориентация 3D-модели в пространстве, что значительно облегчает повторную сборку виртуального стенда в Irrlicht;
- выполняется начальная окраска поверхностей 3D-моделей. Таким образом обеспечивается возможность задать однородный цвет стенда в программном коде, разработанном для визуального движка.

Также Autodesk 3ds Max позволяет перевести 3D-модели из формата STL, в котором сохраняет детали программа SolidWorks, в формат OBJ, требуемый для работы в Irrlicht [6].

Для создания математической модели стенда использовали программный пакет MBTU (Моделирование в технических устройствах). Пакет MBTU обладает низкими системными требованиями, благодаря чему достигается большое быстродействие на маломощных компьютерах. На основе дифференциальных уравнений и анализа составляется математическая модель стенда [7, 8] (рис. 6), которая включает в себя двигатель постоянного тока, тормозную муфту и редуктор. В качестве примера используется шестиступенчатый цилиндрический редуктор с прямозубыми зубчатыми колесами с числом зубьев $Z_1 = 31$ и $Z_2 = 53$ [9].

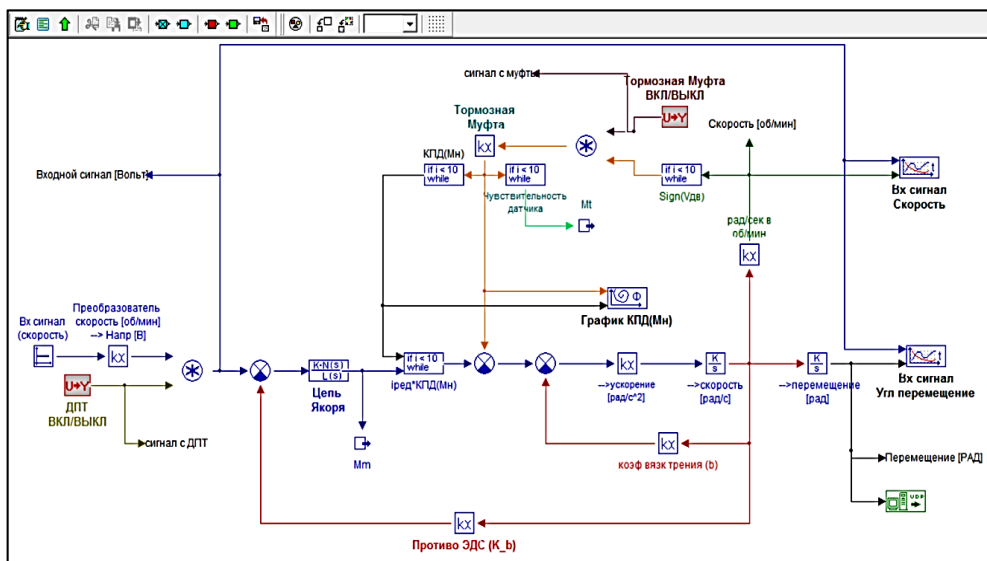


Рис. 6. Компьютерная модель стенда

С помощью встроенного языка программирования необходимо составить блок, рассчитывающий КПД редуктора [10], а также блоки для градуировки двигателя и тормоза, обработки экспериментальных данных и проверки полученных значений (рис. 7).

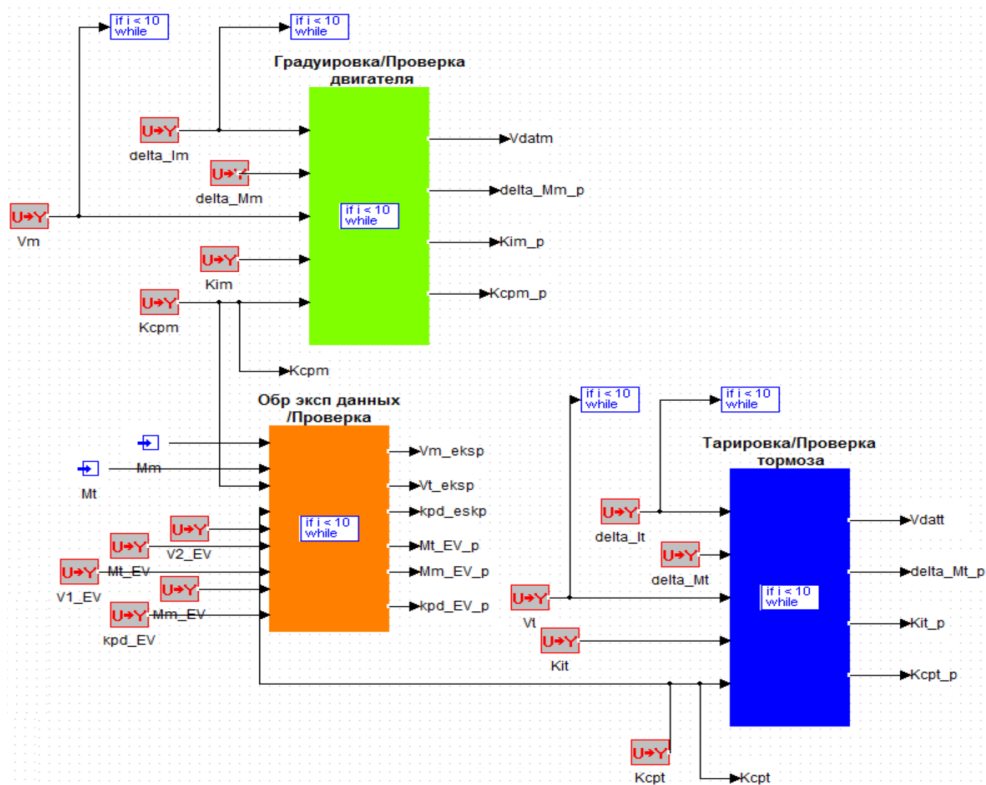


Рис. 7. Блок обработки данных, градуировки и проверки значений

Для создания управляемой 3D-модели станда необходимо написать программу на языке C++ с использованием классов и функций Irrlicht. Первоначально создается массив Node типа IAnimatedMeshSceneNode. Затем осуществляется загрузка деталей из указанной папки. С помощью функций графического движка устанавливается позиция и задается ориентация деталей в пространстве.

В главном цикле программы, в котором происходит вывод на экран команды while(device->run()), выполняются функции, которые позволяют получить данные из MBTU: угол поворота выходного вала редуктора и изменение плеча двигателя и тормоза при тарировке, а также показания индикаторов. Затем эти данные передаются в функцию, отвечающую за анимацию на сцене, в том числе за движение деталей.

Связь MBTU и Irrlicht осуществляется с помощью протокола UDP и текстового файла. Информация передается в одном направлении от источника к получателю без проверки готовности или состояния получателя. По протоколу UDP приходят данные значений угла поворота выходного вала редуктора.

Для создания интерфейса виртуального станда цилиндрической передачи был написан класс, отслеживающий нажатие одной из восьми кнопок: одна из которых

отвечает за выход из программы, другая — за просмотр тарифовочной таблицы, шесть кнопок переключают положение стационарной камеры (см. рис. 3).

Заключение. Отметим, что при проектировании виртуального лабораторного стенда были использованы только открытые версии программных продуктов. Программы, применяемые при разработке виртуального стенда, также занимают малый объем оперативной памяти, что с учетом их большой интегрированности позволяет увеличить быстродействие. Малый объем занимаемой памяти, интегрированность программ между собой, высокое быстродействие, низкие требования к ПО и техническим характеристикам персональных компьютеров, а также доступность средств разработки делают предложенную методику проектирования виртуальных электро-механических лабораторных стендов существенно более привлекательной по сравнению с аналогичными.

В результате проделанной работы был получен виртуальный лабораторный стенд со следующими требованиями, предъявляемыми к компьютеру: наличие ОС не ниже Windows 7, дискретная видеокарта, совместимая с DirectX 9, не менее 200 МБ свободного места на жестком диске. Также был детально описан процесс проведения компьютерной лабораторной работы, разработаны математические модели двигателя и нагрузочной электромеханической муфты, 3D-модели всех деталей лабораторного стенда, виртуальная панель управления лабораторным стендом, математическая и трехмерная модели были сопряжены между собой. Кроме того, установлено, что результаты выполнения компьютерной лабораторной работы хорошо согласуются с экспериментами, проведенными на реальном стенде.

Литература

- [1] Бошняков И. А., Коновалов К. В., Метасов И. Е., Шереужев М. А. Разработка виртуальных стендов по исследованию КПД планетарной и червячной передач. *Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.*, 2014, № 9. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/733859.html> (дата обращения 18.01.2018).
- [2] Персов Б.З., Барков Л.М. (ред.). *Расчет и проектирование экспериментальных установок: учеб. пособие.* 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Ин-т комплекс. исслед.; Ижевск, Dynamics, 2006, 347 с.
- [3] Буцев А.А., Нарыкова Н.И., Недашковский В.М. (ред.). *Исследование параметров многоступенчатого цилиндрического редуктора: учеб. пособие.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 22 с.
- [4] Зубков А.Ю., Пахомов Т.К. Методика разработки управляемых 3D-моделей сложных электромеханических систем на примере цилиндрического редуктора. *Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.*, 2015, № 9. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/802544.html> (дата обращения 18.01.2018).
- [5] Зинovieв Д.А. *Основы проектирования в SOLIDWORKS 2016: электронное учебное пособие.* URL: <https://autocad-lessons.ru/solidworks-book/> (дата обращения 18.01.2018).
- [6] Сайт IRRLICHT. URL: <http://irrlight.sourceforge.net/> (дата обращения 18.01.2018).
- [7] Глазырин А.С. *Математическое моделирование электромеханических систем. Аналитические методы: учеб. пособие.* Томск, Изд-во Томского политехнич. ун-та, 2009, 216 с.
- [8] Попов Е.П. *Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: учеб. пособие для вузов.* 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Наука, 1989, 304 с.
- [9] Мусалимов В.М., Заморуев Г.Б., Калапышина И.И., Перечесова А.Д., Нуждин К.А. *Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics): учеб. пособие для вузов.* Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2013, 114 с.
- [10] Блейз Е.С., Бродовский Б.Н., Введенский В.А., Чемоданов Б.К. (ред.). *Следящие приводы: в 3 т. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 1, 2.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003, 880 с.

Сведения об авторах:

Бошляков Андрей Анатольевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Вельтищев Виталий Викторович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры СМ11 «Подводные аппараты и роботы», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Зубков Антон Юрьевич — инженер МИТ, отдел 24, магистрант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Пахомов Тимофей Константинович — магистрант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Перминова Елена Александровна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры РЛ5 «Элементы приборных устройств», МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 004.67

Универсальная интеллектуальная система поддержки технического обслуживания и предиктивного ремонта объектов частного домохозяйства в рамках концепции интернета вещей

© Власов Андрей Игоревич¹

Кривошеин Алексей Игоревич¹

Филин Сергей Сергеевич²

vlasovai@bmstu.ru

alexeykrivoshein@mail.ru

¹ МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, 105005, Россия

² ООО "Коннект", Москва, 119619, Россия

Предложена концепция программно-аппаратной универсальной интеллектуальной системы для комплексных встраиваемых решений по поддержке технического обслуживания и предиктивного ремонта. Концепция позволяет связывать в единое целое модуль принятия решений и разнородные сенсорные элементы для осуществления управления инженерными модулями, расчета необходимости предиктивного ремонта в целях определения времени замены или сервисного обслуживания объектов инженерных систем. Основное внимание уделено архитектуре предлагаемой универсальной системы, архитектуре контроллера сбора данных и управления — основной единице системы, а также методам взаимодействия и алгоритмам работы системы. Исследованы аналоги предложенного решения, а также расширенные требования к универсальной системе, оснащенной функцией предиктивного ремонта. Обоснован выбор концепции интернета вещей при создании универсальной интеллектуальной системы поддержки технического обслуживания и предиктивного ремонта. Использование парадигмы интернета вещей делает функционал универсального модельного конструктива не только более доступным для частных домохозяйств, но и в перспективе позволит экономить на энергоресурсах и обслуживании инженерных систем. Сведение получаемых данных в единую SCADA систему позволит производить мониторинг основных параметров инженерных систем со своевременным уведомлением об аварийных и критических ситуациях служб МЧС, полиции, газовой службы и пр. Таким образом, результат проекта формирует новый облик системы синтеза гибких роботехнических решений, которому нет аналогов, поскольку все существующие комплексы сильно ограничены по инженерным системам, сбору информации с датчиков и анализу данных.

Ключевые слова: предиктивный ремонт, интернет вещей, сенсорные сети, контроллер сбора данных

Введение. Требования предиктивного ремонта определяют необходимость решения таких проблем, как предотвращение выхода из строя ответственных инженерных систем, нахождение оптимального момента обслуживания и ремонта, предотвращение внештатных ситуаций. Для выполнения указанных требований системе необходимо получать информацию о состоянии большого числа ответственных единиц контролируемой системы в режиме реального времени, накапливать дан-

ные и, отслеживая динамику показаний, иметь возможность предсказывать нестандартную ситуацию, оповещать об этом пользователя, и использовать имеющиеся средства управления для предотвращения поломки. Таким образом, необходимы большие сети с элементами управления и сенсорами, способные независимо взаимодействовать с блоком принятия решений. Данные требования удовлетворяют системы концепции интернета вещей (Internet of Things, IoT) [1].

Чаще всего понятие интернета вещей неразрывно связано со знаниевыми компонентами «умный» дом, «умный» транспорт, «умное» предприятие. Но фактическая идея «интеллектуальности» и «умности» вещей сильно размыта в несформированном представлении людей маркетинговыми манипуляциями. На текущий момент из интернета вещей сделали слишком обширное понятие. К нему пытаются притянуть различное удаленное управление или мониторинг — все это лишь автоматизация. В целом понятие интернета вещей подразумевает под собой помощь во взаимодействии человека и окружающих его вещей. Человек не должен быть центром всего управления, все контролировать. Система должна обеспечивать самостоятельное взаимодействие внутри себя, с минимальным привлечением человека ко всем стадиям управления, лишь при действительной необходимости и потребности внести изменения система должна сообщать об этом человеку.

Для достижения этой цели необходимы мультиагентные технологии. Каждому участнику из реального мира (т. е. каждому человеку и каждому устройству) ставится в соответствие программный агент — объект с некоторой степенью интеллектуальности, представляющий его интересы в виртуальном мире.

Виртуальный мир можно назвать в некоторой степени улучшенной копией нашей жизни: там есть те же участники, которые чаще всего следуют заранее установленным и известным правилам, предоставляя достоверные ответы на заданные вопросы. При этом взаимосвязь реального и виртуального миров является двусторонней: решения из виртуального мира отдаются в реальность для исполнения, а все события реального мира отражаются на мире виртуальном.

Жизненный цикл агентов довольно прост. Сначала они воспринимают информацию из внешнего мира. Потом ее нужно обработать, т. е. запланировать некие действия. Ну а действия уже нужно выполнить — отдав соответствующие команды в реальный мир. Получается, что в «умном» доме агент человека постоянно общается с агентами кофеварки, лампочки и холодильников — отдавая им команды и обмениваясь информацией. Пользуясь функциями такой системы, можно реализовать предиктивный ремонт, т. е. накопление и анализ информации с датчиков и сенсоров, ее последующий анализ для расчета оптимальных периодов обслуживания, вероятностей поломок и своевременного оповещения человека о необходимости вмешательства.

Современных систем по предоставлению данного набора функций не существует, есть подобия. Широко известные системы автоматизации, построенные на проводных шинах KNX и HDL или беспроводных стандартах Zwave и ZigBee, оснащены зачастую не востребованными опциями и в то же время не обладают первоочередными важными функциями. Эти системы позволяют управлять мультимедийными потоками, например, такими как аудио и видео, при этом фактическое отслеживание потребления нагрузки и анализ работы по потребляемой энергии отсутствуют [2–4].

В работе представлена концепция системы с необходимым набором функций для реализации концепции интернета вещей и выполнения задач предиктивного ремонта. Она основана на объединении электрического щитка автоматизации, сети сенсоров и удаленного сервера в единое целое. Основными элементами щитка, помимо

элементов электрики, являются микрокомпьютер, на котором реализован локальный сервер, и универсальный контроллер мониторинга и управления. Локальную сеть организует роутер, подключенный к интернету для связи с удаленным сервером. Такое решение позволяет связывать в единое целое модуль принятия решений и различные сенсорные элементы для осуществления управления инженерными модулями, расчета необходимости предиктивного ремонта в целях определения времени замены или сервисного обслуживания объектов инженерных систем.

Анализ методов и средств предиктивного ремонта. При реализации концепции «умный дом», «умный офис» и т. п. наиболее актуальными становятся вопросы применения базовых универсальных конструкций, обеспечения гибкости и реконфигурируемости используемой системы управления и возможность оперативного технического обслуживания и предиктивного ремонта объектов инфраструктуры в рамках концепции интернета вещей.

Наиболее продвинутые решения ориентируются на создание универсальной информационно-управляющей системы, обеспечивающей мониторинг, удаленное управление, самостоятельное принятие системой решений и поддержку состояния системы на универсальной платформе в целях оперативного контроля их состояния, поддержки технического обслуживания, предиктивного ремонта и оповещения о возникающих плановых, нештатных и критических ситуациях, в том числе в ходе участия в соревнованиях. Программно-технический комплекс должен взаимодействовать с подсистемами энергоснабжения, универсального шасси, модуля навигации. Программно-техническая разработка должна обеспечивать мониторинг инженерных систем (сбор информации с построением графиков и временных отчетов по текущим данным), обработку полученной информации (расчет обслуживания, предиктивного ремонта и замены элементов), своевременное оповещение и помощь в принятии решений, удаленное управление инженерными системами при наличии такого функционала и самодиагностику основных узлов. Результаты мониторинга должны передаваться в единое облачное хранилище.

В рамках работы предложена концепция универсальной интеллектуальной коммуникационной платформы для комплексных встраиваемых решений (в том числе робототехнических), которая позволяет связывать в единое целое модуль принятия решений и различные сенсорные элементы, системы навигации и позиционирования (рис. 1).

Отметим, что в парадигме интернета вещей аппаратным подсистемам добавляется программный уровень, который позволяет перенести вычислительные задачи непосредственно на сами и исполнительные устройства, передавать обработанные данные на станцию сбора и хранения данных.

Пока устройств, созданных в данной концепции для частных домохозяйств практически нет на рынке, задачу можно решать с помощью универсальных контроллеров. Такие контроллеры обладают достаточной вычислительной мощностью, чтобы выполнять задачи не только обработки данных, полученных от полевых приборов, но и задачи требующие выполнения сложных алгоритмов вычисления, например вычисление расхода тепла по данным датчиков температур и расходомера теплоносителя, а также выполнять алгоритмы прикладных технологических задач, таких как управление насосами, вентиляторами, запорной арматурой, дозирующими устройствами, освещением, оповещение персонала об аварийных ситуациях. Например, регулирование температуры теплоносителя во вторичных контурах вентиляционных систем должно осуществляться по нескольким параметрам, в том числе математически увязываться с температурой наружного воздуха, учитывать человеческий фактор [5, 6].

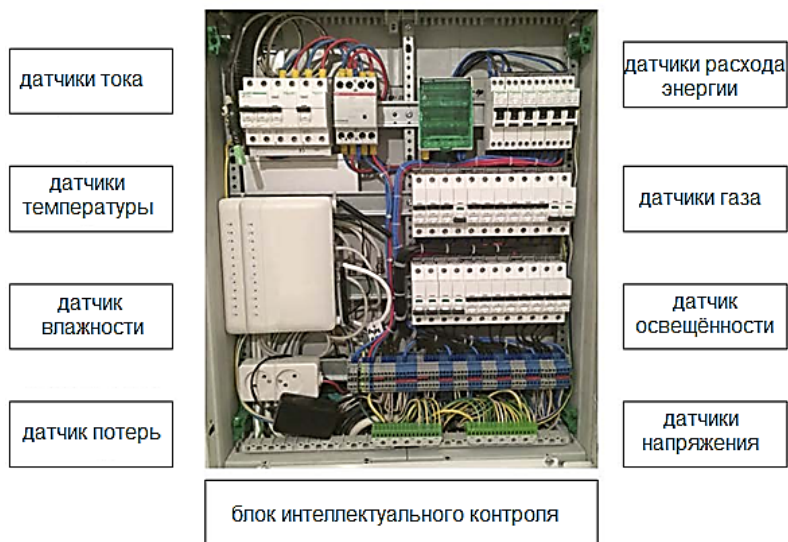


Рис. 1. Внешний вид универсального коммуникационного модуля для встраиваемых интеллектуальных систем

Универсальные контроллеры могут выполнять также функцию буферного устройства памяти: в память контроллера записываются все измеряемые и вычисляемые значения величин, которые затем хранятся в течение необходимого срока. Таким образом, даже в случае пропадания связи со станцией сбора данных значения будут буферизированы, а затем переданы на сервер при возобновлении связи.

Особое внимание должно быть уделено тому, чтобы создаваемые программно-технические и конструкторские решения были масштабируемыми и расширяемыми при локализации решения для конкретных параметров. Таким образом, можно обозначить следующие задачи, которые должны быть решены на аппаратном уровне (уровне контроллеров):

- перевод сигналов от приборов полевого уровня (датчики) в инженерные единицы и передача информации на станцию сбора данных;
- выполнение алгоритмов вычисления значений физических величин для учета полученных данных;
- управление техническими системами как с учетом заложенных алгоритмов, так и по указанию головной станции;
- формирование и передача сигналов предупреждающей и аварийной сигнализации.

Задачи станции сбора данных (модуля обработки) можно более подробно представить следующим образом:

- структуризация и формализация измерительной информации, накопление динамики изменений;
- обработка и анализ поступающих данных;
- анализ полученных результатов обработки в целях выявления нетипового поведения и поиск на основе результатов анализа перечня возможных причин и факторов, которые могут привести к развитию нестандартных ситуаций.

В общем случае полученная информация может содержать шумы и обладать неоднородным характером. Для устранения этого полученным данным применяют ма-

тематические методы обработки, такие как оценка среднего значения наблюдаемой случайной величины, оценка вероятности случайного события по частоте, оценка необходимого числа экспериментов для оценивания вероятности частного события, анализ и кластеризация параметров и другие. Анализ отклонений может осуществляться с использованием как простейших пороговых значений, так и совместно с анализом совокупности данных, когда каждый параметр в отдельности находится в допустимом интервале, а совокупность значений свидетельствует о развитии нештатной ситуации [2].

Результаты проведенных исследований позволяют не только аргументировано выбрать комбинации методов, которые дают наиболее точную оценку текущей ситуации, но и выявить взаимосвязи вероятностей наступления нештатных ситуаций и вероятности передачи полных данных. Предварительные исследования признаков нештатных ситуаций дают возможность говорить о стохастическом характере последних.

Наиболее эффективным рекурсивным алгоритмом предсказания обработки является фильтр Калмана [2]. Фильтр Калмана (ФК) — эффективный рекурсивный фильтр, оценивающий вектор состояния динамической системы с использованием ряда неполных и зашумленных измерений. Для того чтобы управлять динамической системой, необходимо в первую очередь определить ее текущее состояние. Для этих целей не всегда существует возможность измерить каждый интересующий пользователя параметр управления, тогда как ФК обеспечивает систему средствами для получения отсутствующей информации о неизвестных параметрах косвенных измерений. Фильтр Калмана также используется для предсказания возможных тенденций развития динамических систем, которыми невозможно управлять, например, дебит воды в реках во время наводнения, траектории небесных тел или уровни цен на продаваемые товары.

Математический фундамент для ФК строится на основе метода наименьших средних квадратов и стохастических системах, которые, в свою очередь, базируются на методе наименьших квадратов, теории вероятности и динамических системах. С помощью этого функционала будет происходить обработка собранной информации для анализа предсказания предиктивного ремонта оборудования инженерных систем и их составных частей [7, 8].

Универсальная интеллектуальная система поддержки технического обслуживания и предиктивного ремонта. Основными элементами системы являются локальный сервер, универсальный контроллер мониторинга и управления, удаленный сервер с общей для всех устройств базой данных. Локальную сеть организует роутер, подключенный к интернету для связи с удаленным сервером (рис. 2).

Локальный сервер хранит сценарии обработки информации, и принятия решений по управлению системой, а также имеет собственную базу данных для временного хранения информации перед отправкой на удаленный сервер. Сбор информации и управление контроллером мониторинга и управления организован посредством протокола MQTT, где локальный сервер является брокером. Связь 4 на рис. 2 между роутером и устройством, организующим локальный сервер (например, одноплатный компьютер), осуществляется с помощью Ethernet-кабеля, связь 5 между роутером и блоком связи контроллера — также с помощью Ethernet-интерфейса, однако может быть организована и через WI-FI-соединение.

Главной задачей контроллера мониторинга и управления является сбор данных с подключенных к нему разнотипных датчиков и сенсоров, передача информации локальному серверу по локальной сети, получение команд на управление и непосред-

ственное управление драйверами и реле. Контроллер состоит из одного блока связи и одного или нескольких блоков управления и сбора информации. Связь 6 между блоком связи и блоками управления и сбора осуществляется по интерфейсу RS-485 через адресованные запросы блока связи и ограниченные по объему и времени ответы блоков управления и сбора. Это позволяет организовать надежный проводной канал длиной до 1200 м и пропускной способностью, достаточной для решения большинства задач автоматизации. При чрезмерной загруженности этого канала с целью обеспечения большей скорости взаимодействия между блоками возможно подключение еще одной ветки интерфейса RS-485 к тому же блоку связи, т. е. организация второго независимого канала. При этом виртуально все датчики и устройства управления будут определяться подключенными к контроллеру управления и мониторинга и иметь свой независимый идентификационный номер [9, 10].

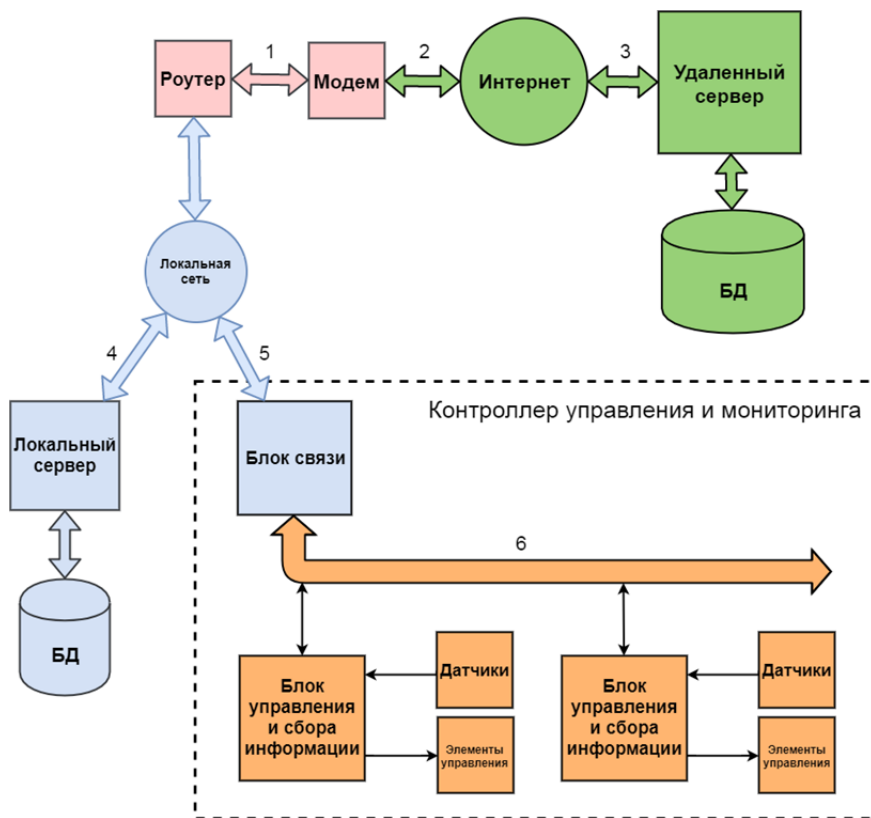


Рис. 2. Структурная схема универсальной интеллектуальной система поддержки технического обслуживания и предиктивного ремонта объектов частного домохозяйства

Такая концепция позволяет обращаться посредством команд к любому датчику или устройству управления как независимому, включенному в общую сеть устройств. Сценарии взаимодействия устройств, реализуемые локальным сервером, позволяют автоматизировать управление реле и драйверами (освещения, приводов и т. п.) по сигналам с датчиков или другим событиям.

Возможность постоянной корректировки сценариев локальных серверов, временной автономной работы системы при прерывании интернет-соединения, возможность непосредственного управления системой с удаленного сервера и оповещения человека создают аппаратную основу для реализации концепции интернета вещей.

Постоянный сбор и накопление данных, получаемых с датчиков, в базе данных удаленного сервера, через интернет создают аппаратную базу для реализации предиктивного ремонта.

Выводы. Предлагаемые комплексные программно-технические и конструкторские решения по формированию единой универсальной робототехнической платформы позволяют выполнять сбор информации во всем ее многообразии с датчиков тока, температуры, влажности, энергопотребления, газа, пожарных датчиков и систем охраны, включая видеонаблюдение, осуществлять мониторинг, удаленное автоматизированное или самостоятельное управление инженерными модулями, а также работу с регулярными событиями по их сервисному обслуживанию, а также устанавливать необходимость предиктивного ремонта в целях определения времени замены или сервисного обслуживания объектов (элементов) встраиваемых систем.

Результаты проекта легко могут быть применены в рамках европейского стандарта Zero Energy Building, что открывает широкие перспективы для экспорта результатов проекта. Нельзя не отметить социальную значимость результатов проекта, поскольку сведение получаемых данных в единую SCADA-систему позволит проводить мониторинг основных параметров инженерных систем со своевременным уведомлением об аварийных и критических ситуациях МЧС, полиции, газовой службы и пр.

Таким образом, результат проекта формирует новый облик системы синтеза гибких робототехнических решений, которому нет аналогов, поскольку все существующие комплексы сильно ограничены по инженерным системам, сбору информации с датчиков и анализу данных.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МОН РФ
в рамках проекта №14.579.21.0142 UID RFMEFI57917X0142.*

Литература

- [1] Кривошеин А.И., Филин С.С. Анализ методов предиктивного ремонта в концепции «интернет вещей». *Всерос. форум науч. молодежи «Богатство России»: сб. докл.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018, с. 76–77.
- [2] Vlasov A.I., Yudin A.V., Salmina M.A., Shakhnov V.A., Usov K.A. Design Methods of Teaching the Development of Internet of Things Components with Con-sidering Predictive Maintenance on the Basis of Mechatronic Devices. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no 20, pp. 9390–9396.
- [3] Lee J., Lapira E., Yang S., Kao Ha. Predictive manufacturing system - trends of next generation production systems. *IFAC Proceedings Volumes (11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems)*, May 2013, vol. 46, iss. 7, pp. 150–156.
- [4] Vermesan O., Friess P. *Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems*. Aalborg, Denmark, River Publishers, 2013, pp. 1–7.
- [5] Mattern F., Floerkemeier Ch. From the Internet of Computers to the Internet of Things. *ETH Zurich*. Retrieved, 23 October 2016, pp. 7–11.
- [6] Баринов В.В., Коротаев А.Н., Пылькин А.Н., Пролетарский А.В. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. Москва, Изд-во «КУРС», 2017, 240 с.
- [7] Юлдашев М.Н., Власов А.И. Гауссовские процессы в регрессионном анализе состояний беспроводной сенсорной сети с учетом электромагнитных помех. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2017, № 3 (62), с. 35–43.

- [8] Юлдашев М.Н., Адамов А.П., Адамова А.А., Классификация состояний беспроводной сенсорной сети с использованием методов машинного обучения. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*, 2016, № 2, с. 248–251.
- [9] Юлдашев М.Н. Энергосберегающая технология передачи данных в беспроводных сенсорных сетях. *Энергосбережение и эффективность в технических системах: матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов*. Тамбов, 10–12 июля 2017, с. 177–178.
- [10] Иванов А.М., Власов А.И. Верификация программных моделей коммуникационных сетей. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2012, № 10, с. 24.

Сведения об авторах:

Власов Андрей Игоревич — канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» по научной работе, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Кривошеин Алексей Игоревич — аспирант кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Филин Сергей Сергеевич — технический директор ООО «Коннект»

УДК 681.142.2

Анализ противоречий синтеза распределенных сенсорных сетей

© Власов Андрей Игоревич
Юлдашев Михаил Николаевич

vlasovai@bmstu.ru
mihail777str@yandex.ru

МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия

Проведен анализ и выполнена классификация основных противоречий, которые возникают при решении задач синтеза распределенных сенсорных систем. Основное внимание уделено исследованиям методов и средств распределенных сенсорных систем, функционирующих в условиях обеспечения минимизации сетевой нагрузки. Данный подход с использованием концепции кластеризации на основе события позволяет синтезировать динамически обновляющееся дерево транзакций с гарантированным временем доставки пакетов данных от активных сенсоров к блоку управления. Кратко проанализирована концепция сенсора шлюза, предназначенного для сбора информации от группы сенсоров, позволяющей минимизировать размеры группы сенсоров, увеличить срок их активной деятельности, повысить скорость обмена информацией без использования в сети дополнительного оборудования. Предложены подходы к реализации системы принятия информации от всей группы сенсоров, ее обработки и принятия решения. Даны рекомендации по разработке специального программного обеспечения. Помимо обеспечения общей эффективности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях предлагаемые решения позволяют обеспечить упреждающее принятие решения, повышение помехоустойчивости, адаптацию к изменениям окружающей среды. Сформулированные принципы проектирования адаптивной беспроводной модульной сенсорной сети с алгоритмами машинного обучения и алгоритмы адаптации беспроводной сети к внешней среде позволяют использовать подобные сети в различных условиях без дополнительной подстройки. На основе обрабатываемой информации предлагаемые решения дают возможность классифицировать состояние сети, прогнозировать показания и самостоятельно принимать решения о наличии регистрируемого события. Предложенная методика синтеза сенсорной сети позволяет снизить энергопотребление элементов сети при использовании протокола IEEE 802.11 по сравнению с протоколом IEEE 802.15.4 более чем на 20 % при питании сенсоров от точки доступа беспроводной сети.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, балансировка сетевой нагрузки, сенсорный шлюз, электропитание сенсора

Введение. Беспроводные сенсоры сети (БСС) в последнее время получают все большее распространения для различных приложений. Обусловлено это тем, что их использования приносит значительный синергетический эффект [1–4]:

- автоматизация процессов жизнедеятельности;
- эффективная обработка данных, упрощение доступа к ним;
- удаленное взаимодействие;
- обеспечение защиты от вредных и опасных факторов.

Беспроводные сенсоры сети нашли применение в различных областях жизнедеятельности человека, таких как промышленность, жилищно-коммунальной ком-

плекс, домашние хозяйства, медицина и др. Среди перспективных областей применения следует отметить [1]:

- мониторинг/наблюдение;
- контроль/предупреждение;
- учет/хронологию;
- обработку информации;
- передачу информации;
- управление исполнительными механизмами, ресурсами;
- поддержание заданных условий.

Суть данной работы заключается в обобщении и систематизации базовых противоречий сенсорных сетей, которые заключаются в нерациональном использовании энергии сенсоров, выбранной архитектуры сети и алгоритмов передачи данных внутри кластера для классификации состояний сенсорной сети. Предложены новые подходы разрешения указанных противоречий, которые заключаются в использовании методов машинного обучения для сокращения количества и частоты передачи данных внутри сети в результате использования математической модели, построенной на основе базы знаний, и исключения из состава сети сенсоров, не релевантных данной модели [5–7]. При проектировании БСС закладываются основные архитектурные и системотехнические решения, которые главным образом определяют эффективность, надежность и безопасность системы при эксплуатации в будущем. Последующие изменения и разработка структуры и принципов работы БСС зачастую требуют либо существенно больше времени и ресурсов, либо невозможны без кардинальных изменений архитектуры системы.

Объектом исследования в рамках данной работы является БСС, методы ее проектирования с использованием встраиваемых элементов (IP-блоков). Основное внимание уделяется вопросам повышения энергоэффективности работы БСС [7, 8]. Поскольку большая часть узлов сети работает автономно, характер использования энергоресурсов напрямую влияет на срок службы сети. Базовые противоречия сенсорных сетей можно сформулировать следующим образом: с увеличением числа сеансов связи растут энергозатраты узлов, что ведет к сокращению времени автономной работы узла, с уменьшением — повышается вероятность пропуска важных событий, что может привести к неверному принятию решения.

В работе исследован метод разрешения вышеуказанного технического противоречия за счет динамического изменения частоты передачи данных в зависимости от тенденции изменения показаний сенсоров. Для этого был разработан алгоритм принятия информации от всей группы сенсоров.

Помимо обеспечения общей эффективности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях предлагаемые в работе решения позволяют обеспечить упреждающее принятие решения о состоянии сети, повышение помехоустойчивости и адаптацию к изменениям окружающей среды.

Результаты работы в части построения энергоэффективной сенсорной сети можно использовать для гражданских и специальных применений [9, 10]:

- космонавтика (мониторинг обстановки внутри и вне корабля);
- приложения МВД (наблюдение за объектами);
- строительство (наблюдение за состоянием зданий и сооружений);
- работа МЧС (оценка ситуации);
- сельское хозяйство (наблюдение за состоянием сельхозкультур и животными)

и др.

Анализ принципов функционирования и синтеза сложных сенсорных сетей. Беспроводным сенсорным сетям (БСС) в последнее время уделяется все большее внимание. При проектировании БСС закладываются основные архитектурные и системотехнические решения, которые главным образом определяют эффективность, надежность и безопасность системы при эксплуатации [11, 12]. Последующие изменения и доработки структуры и принципов работы БСС зачастую требуют либо существенно больше времени и ресурсов, либо невозможны без кардинальных изменений архитектуры системы. Исходя из этого, необходимо уделять большое внимание используемой методике проектирования БСС, чтобы на начальном этапе построить наиболее корректную архитектуру и предложить соответствующие системотехнические решения.

При построении БСС изначально встает вопрос: проектировать систему полностью самостоятельно (авторское проектирование) или использовать готовые встраиваемые элементы (IP-блоки) (встраиваемое проектирование). У каждого из вариантов есть свои преимущества и недостатки. Существует несколько уровней, на которых можно применять готовые решения. Каждое готовое решение накладывает на разрабатываемую систему свои ограничения (табл. 1).

Таблица 1

Уровни готовых решений проектирования БСС

Уровень	Предлагаемые решения	Ограничения
1 Технологический	Интерфейсы передачи данных, топология сети и маршрутизация	Скорость передачи данных, количество узлов сети и их расположение
2 Элементный	Датчики, элементы питания, радиопередатчики, радиоприемники, память	Контролируемые параметры внешней среды, срок автономной работы узла сети, время обработки и объем хранимой информации, дальность передачи данных
3 Модульный	Модули сенсорной сети (NCD, FFD, RFD)	Габариты и способы фиксации узлов БСС, количество датчиков у одного модуля, степень защиты от внешних воздействий
4 Системный	БСС, группы модулей	Типы используемых модулей сенсорной сети
5 Прикладной	Функции БСС, программное обеспечение	Набор выполняемых задач, структура данных, специфика пользовательского интерфейса

Уровень использования готовых решений напрямую зависит от специфики функций проектируемой БСС. Как правило, специфические требования к системе встречаются редко, иначе они уже имеют реализацию на готовых элементах. Сводная информация представлена в табл. 2.

Каждый следующий уровень использования готовых решений сокращает сроки проектирования БСС, в то же время накладывает ограничения на использование системы. Данные ограничения определяются совокупностью ограничений всех предыдущих уровней. Выбор уровня зависит от требований технического задания.

Методика получения информации от всей группы сенсоров, ее обработки и принятия решения. Большинство исследований БСС направлены на повышение таких качеств, как эффективность, надежность и безопасность системы. В данной работе основное внимание будет уделено повышению энергоэффективности работы БСС. Поскольку большая часть узлов сети работает автономно, характер использования энергоресурсов напрямую влияет на срок службы работы сети.

**Преимущества и недостатки полностью самостоятельного проектирования БСС
с использованием готовых встраиваемых элементов**

Метод проектирования	Преимущества	Недостатки
Авторское проектирование	<ul style="list-style-type: none"> – разработчики имеют полное представление о работе системы; – известно, как устранять возникшие проблемы и возможность достаточно точно определить время на доработку; – потенциал для максимально оптимального решения; – возможность непрерывной доработки элементов в желаемом направлении 	<ul style="list-style-type: none"> – требуются высококвалифицированные разработчики для проектирования качественной системы; – длительная разработка; – как правило, не учитывается множество нюансов, что приводит к возникновению проблем в будущем; – требуется много времени в освоении разработанной системы
Встраиваемое проектирование	<ul style="list-style-type: none"> – быстрая разработка; – готовые элементы уже протестированы; – готовые элементы знакомы широкому кругу людей, поэтому существенно легче найти разработчиков; – готовые элементы, как правило, учитывают различные нюансы, которые не учесть при самостоятельной разработке; – разработчик концентрируется на основном функционале системы, а не на принципах работы; – как правило, присутствует готовая документация 	<ul style="list-style-type: none"> – много внутренних элементов, довольно сложная архитектура, поэтому трудно разбираться в них; – функционал готовых элементов ограничен и стандартизирован, поэтому приходится свои задачи подстраивать под них; – зачастую требуемые специфические задачи решаются не самыми оптимальными способами; – при самостоятельной доработке элементов в будущем могут возникнуть проблемы с использованием более новых элементов

Существенная часть энергии узлов сети расходуется на процесс коммуникации по беспроводной связи. Простое решение по сокращению числа сеансов связи порождает техническое противоречие: с увеличением числа сеансов связи растут энергозатраты узлов, что ведет к сокращению времени автономной работы узла, с его уменьшением повышается вероятность пропуска важных событий, что может привести к неверному принятию решения.

Разрешение вышеуказанного технического противоречия предлагается за счет динамического изменения частоты передачи данных в зависимости от тенденции изменения показаний датчиков. Такое решение возможно реализовать посредством принятия информации от всей группы сенсоров, ее обработки и принятия решения.

Процесс *принятия информации от узлов сети* можно характеризовать по следующим параметрам [5, 10]:

- инициатор передачи данных (сенсор, базовая станция, оператор);

– тип передаваемой информации (состояние узла, параметры среды, управляемые сигналы и т. д.);

– важность передаваемых сообщений.

Обработка полученной информации от узлов сети включает в себя:

– унификацию данных согласно принятым мета-данным;

– анализ и модификацию данных с целью повышение их достоверности (исключение помех, выбросов и т. д.);

– логирование информации;

– принятие решения о состоянии системы;

– принятие решения о последующих действиях;

– формирование исполнительных инструкций для узлов сети.

Принятие решения об изменении частоты передачи данных может быть осуществлено либо на стороне сенсора (сенсор самостоятельно определяет, с какой частотой ему посылать данные), либо на стороне базовой станции (базовая станция по необходимости запрашивает данные с сенсоров). Поскольку для принятия решения необходимо знать состояние системы в целом, а данной информацией располагает только базовая станция, то, следовательно, она же должна определять периодичность запросов данных с сенсоров.

Для определения частоты запроса данных предлагается использовать методы машинного обучения. Они ориентированы на построения математической модели поведения внешней среды, где параметры данной системы определяются путем обучения на выборке данных с сенсоров и результатов принятия решения главным модулем или оператором. В последующем применение данной модели позволит исключить постоянный поток передачи данных между узлом и главным модулем, а сведет к посылкам управляющих команд. Тем самым снизится нагрузка на сеть, уменьшатся энергозатраты узла благодаря сокращению длительности сеансов связи и энергозатрат главного модуля за счет распределения вычислительной нагрузки.

Исследование методов машинного обучения для балансировки нагрузки энергоэффективных сенсорных систем. Балансировка нагрузки заключается в распределении задач между элементами сети с целью оптимизации использования ресурсов, сокращения времени вычисления, горизонтального масштабирования сенсорного кластера, а также обеспечения отказоустойчивости работы системы.

Для определения состояния сети используются данные с сенсоров. Предлагаемый метод повышения энергоэффективности сенсорной сети основывается на гипотезе, что существует подмножество показаний сенсоров, вклад которых при формировании итогового решения незначителен или вовсе отсутствует. Таким образом, исключение вышеуказанных данных не нарушит функционирование системы, а энергия будет использоваться более эффективно.

Для проверки данной гипотезы выполнено полунатурное моделирование работы сенсорной сети, состоящей из 20 сенсоров, каждый из которых каждую минуту предоставляет данные о четырех параметрах внешней среды: температуре, давлении, влажности и освещенности. Динамика изменения показаний была выполнена с помощью гауссовских процессов [5]. Результаты исходных данных представлены на рис. 1.

На основе линейного алгоритма классификации состояний сети, который сопоставил данные о температуре и влажности в конкретный момент времени с одним из пяти состояний: 0 — нормальное, 1 — повышенная температура, 2 — возгорание, 3 — повышенная влажность, 4 — переохлаждение (данные о давлении и освещенности не использовались), получены результаты классификации, представленные на рис. 2.

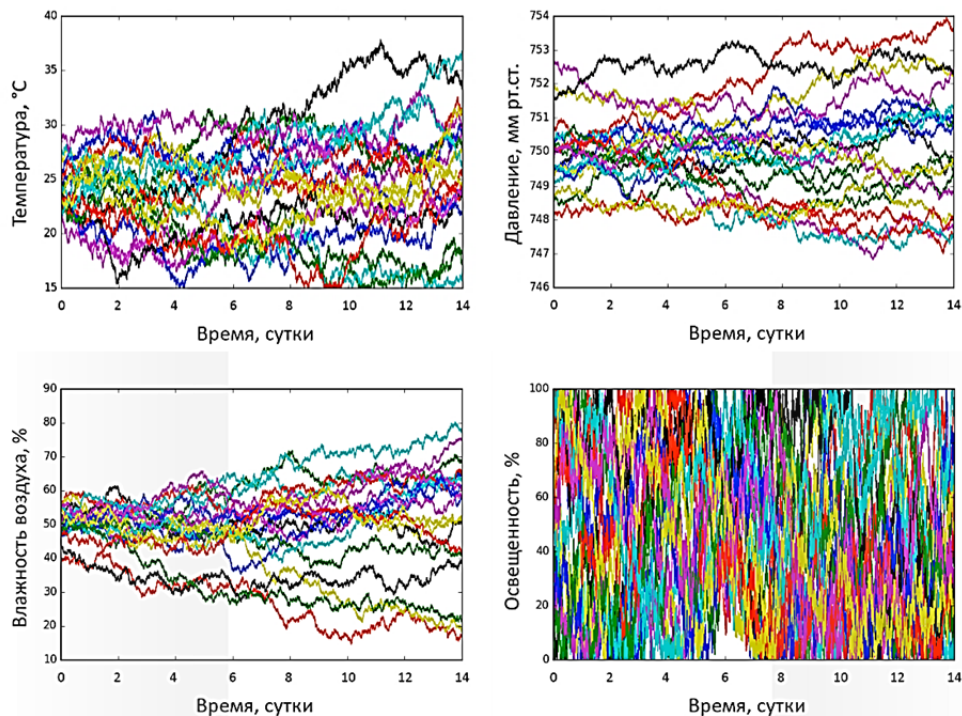


Рис. 1. Показания исходных данных сенсорной сети по параметрам: температура, давление, влажность и освещенность

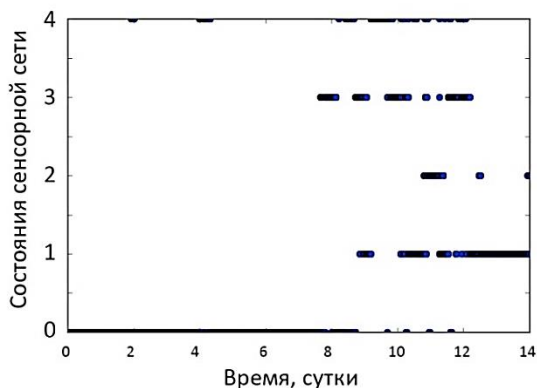


Рис. 2. Распределение состояний сенсорной сети:
 0 — нормальное, 1 — повышенная температура, 2 — возгорание,
 3 — повышенная влажность, 4 — переохлаждение

В качестве модели классификации было выбрано решающее дерево (decision tree). Выбор обусловлен тем, что в подобных моделях процесс вычисления построен на конъюнктивных закономерностях, состоящих из множества предикатов для входных данных, что соответствует процессу принятия решения оператором. Помимо

этого, решающие деревья позволяют производить классификацию с пропусками во входных данных, что имеет место быть в сенсорных сетях.

Для построения требуемого решающего дерева наиболее подходящим является рекурсивный алгоритм ID3. На каждой итерации алгоритма в зависимости от результата разбиения подвыборки по критерию информативности $I(\beta, U)$ к бинарному дереву добавляется вершина с предикатом или листок с классом.

В качестве функции $I(\beta, U)$ критерий используется критерий Джинни:

$$I(\beta, U) = \{ \{u_i, u_j\} : y_i \neq y_j \text{ и } \beta(u_i) = \beta(u_j) \}.$$

Максимизацию этого критерия можно интерпретировать как максимизацию числа пар объектов одного класса, оказавшихся в одном поддереве. Алгоритм построения решающего дерева ID3 представлен на рис. 3.

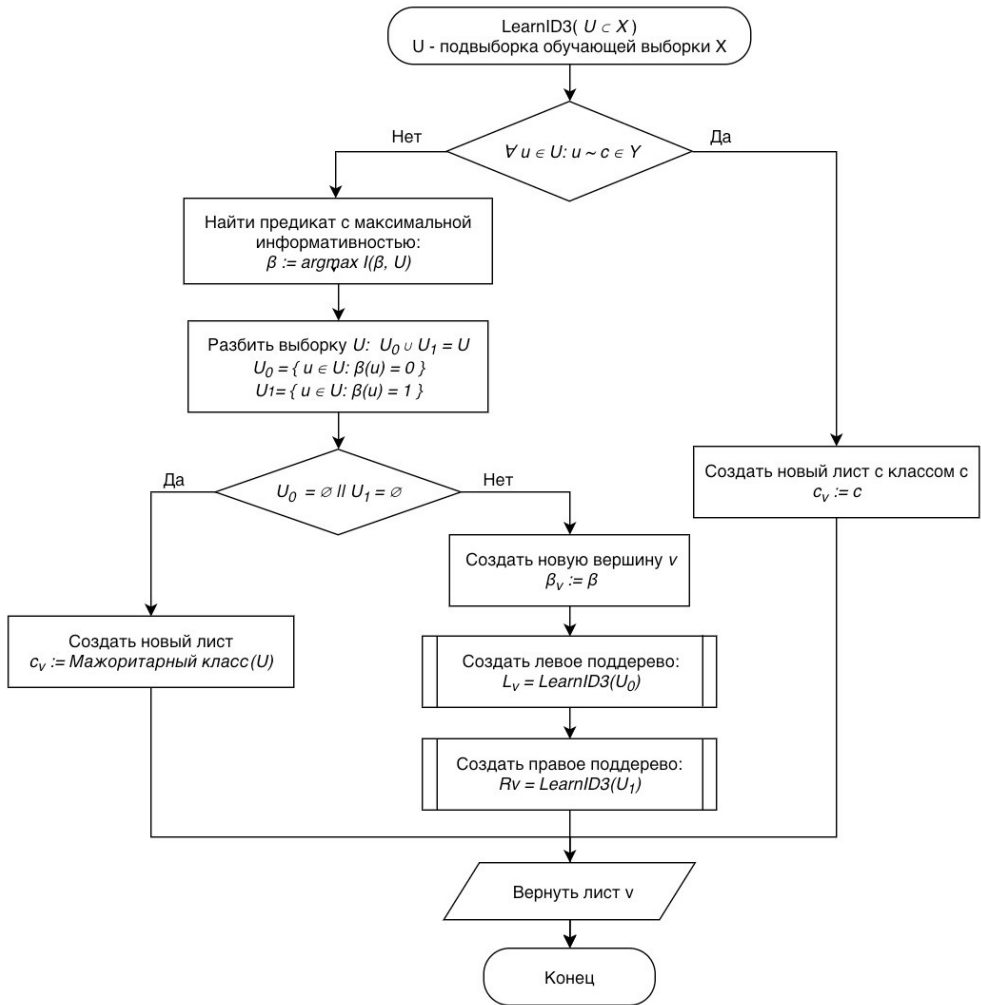


Рис. 3. Алгоритм построения решающего дерева ID3

Исходный набор данных был разделен на обучающую и тестовую подвыборки в соотношении 4 : 1. Реализация модели решающего дерева была выполнена на программном языке Python с помощью библиотеки Scikit-Learn [<http://scikit-learn.org>].

На первом этапе случайным образом было выбрано 80 % данных, на которых было построено решающее дерево по алгоритму ID3. На втором этапе оставшиеся 20 % данных были классифицированы с помощью полученной модели. Для оценки достоверности построенной модели была рассчитана точность:

$$\text{Точность} = T/(T + F) = 4030/4032 = 99 \%,$$

где T — количество верных ответов; F — количество ошибочных ответов.

Таким образом, построенная модель показала, что может классифицировать состояние сенсорной сети с вероятностью 99 %.

Решающее дерево содержит множество предикатов, каждый из которых сопоставляется с одним из параметров входных данных, при этом, если параметр не имеет предиката, то он не влияет на процесс классификации. Для текущей модели был построен график распределения весов для параметров входных данных. На рис. 4 видно, что показания давления и освещенности от всех датчиков не имеют значения при принятии решения. Далее из тестовой выборки были исключены вышеуказанные показания, обучена новая модель решающего дерева и проведено тестирование. При этом была определена точность классификации:

$$\text{Точность} = T/(T + F) = 4030/4032 = 99 \%.$$

В результате исключения из входных данных параметров с нулевыми весами получили аналогичную точность.



Рис. 4. Распределение весов решающего дерева по входным параметрам

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что затраты энергии на контроль параметров с нулевыми весами не оправданы и их можно исключить. Также можно исключать параметры, веса которых очень близки к нулю, при этом точность классификации может немного ниже. Поиск компромисса между точностью и количеством параметров зависит от решаемой задачи и в каждом случае должен осуществляться индивидуально.

Выводы. Задача минимизации сетевой нагрузки в БСС решается благодаря применению специализированных протоколов, позволяющих аппроксимировать наилучшее решение для структуры кластера БСС заданного размера. Одним из таких протоколов является модификация DECR-протокола. Она позволяет минимизировать энергопотребление для заданной достоверности данных при передаче от сенсора к блоку управления при построении квазиоптимального дерева транзакций. Динамическая структура дерева и сигнал обратной связи с информацией о надежности принимаемых данных позволяют адаптивно реконфигурировать дерево транзакций и подстраивать его структуру с учетом параметров окружающей среды и заданных начальных условий. Разработанный подход позволяет существенно снизить сетевую и энергетическую нагрузку на элементы БСС за счет организации динамических кластеров только при наступлении регистрируемого события (наличия активных сенсоров). Однако разработанный подход подходит только для сетей определенного размера (до 100 сенсоров). Дальнейшие исследования будут направлены на более универсальный метод, который можно будет применять к сетям большего размера.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МОН РФ
по соглашению №2.4176.2017/4.6*

Литература

- [1] Терентьев М.Н. *Беспроводные сенсорные сети: учеб. пособие*. Москва, Изд-во МАИ, 2008, 95 с.
- [2] Баринов В.В., Коротаев А.Н., Пылькин А.Н., Пролетарский А.В. *Вычислительные системы, сети и телекоммуникации*. Москва, Изд-во «КУРС», 2017, 240 с.
- [3] Сергиевский М. Беспроводные сенсорные сети. Ч. 2. [Электронный ресурс]. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=18943> (дата обращения 10.03.2018).
- [4] Смирнова Е.В., Пролетарский А.В., Ромашкина Е.А., Балюк С.А., Суоров А.М. Технологии современных беспроводных сетей WI-FI. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 448 с.
- [5] Юлдашев М.Н., Власов А.И. Гауссовские процессы в регрессионном анализе состояний беспроводной сенсорной сети с учетом электромагнитных помех. *Технологии электромагнитной совместимости*, 2017, № 3 (62), с. 35–43.
- [6] Юлдашев М.Н., Адамов А.П., Адамова А.А., Классификация состояний беспроводной сенсорной сети с использованием методов машинного обучения. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*, 2016, № 2, с. 248–251.
- [7] Юлдашев М.Н. Энергосберегающая технология передачи данных в беспроводных сенсорных сетях. *Энергосбережение и эффективность в технических системах: матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов*. Тамбов, 10–12 июля 2017, с. 177–178.
- [8] Зимин Д.В., Муравьев К.А. Анализ проблем энергоэффективности беспроводных сетей передачи данных на базе стека протоколов ZIGBEE. *Тр. междунар. симп. «Надежность и качество»*, 2016, № 1, с. 195–197.
- [9] Шахнов В.А., Власов А.И., Резчикова Е.В., Токарев С.В., Смурьгин И.М., Денисенко Н.А., Муравьев К.А. *Способ функционирования беспроводной сенсорной сети*. Пат. на изобретение РФ. RUS № 2556423 от 05.07.2013.
- [10] Денисенко Н.А., Лавров А.В., Муравьев К.А., Чебова А.И. Исследования сенсорной сети датчиков давления. *Датчики и системы*, 2013, № 9 (172), с. 51–55.
- [11] Иванов А.М., Власов А.И. Верификация программных моделей коммуникационных сетей. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2012, № 10, с. 24.

- [12] Власов А.И., Карпунин А.А., Ганев Ю.М. Системный подход к проектированию при каскадной и итеративной модели жизненного цикла. *Тр. междунар. симп. «Надежность и качество»*, 2015, т. 1, с. 96–100.

Сведения об авторах:

Власов Андрей Игоревич — канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» по научной работе, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Юлдашев Михаил Николаевич — аспирант кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 629.365

Разработка системы управления приводами ног шагающего робота при статическом перемещении в концепции адаптивной локомоции

© | Воевода Никита Николаевич
Лапин Дмитрий Владимирович

threespots@mail.ru
lapindv@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлена концепция алгоритма, контролирующего схему перемещения мобильного шагающего робота, что позволит в перспективе добиться повышенных характеристик проходимости в экстремальных условиях. Ранее проведенный анализ современных технологических решений показал их основные преимущества и недостатки, на основе чего был сделан вывод о формировании рассматриваемой концепции. В дальнейшем сформированные задачи, а также требования к реализации алгоритма для текущего внешнего облика робота позволили прийти к циклу расчета и схеме состояний алгоритма. Была разработана система управления ногами шагающего робота в среде MATLAB и сделан вывод о дальнейшей проработке алгоритма и интеграции его в комплексную систему управления роботом.

Ключевые слова: локомоционный робот, мобильный робот, механическая схема локомоции, метод перемещения робота, система управления приводом, экстремальная робототехника, кинематический шаблон

Введение. Разработка концепции осуществляется на основе ранее проведенного анализа применяемых в настоящее время адаптивных систем шагающих роботов [1–4]. Результаты анализа показали, что методы локомоции должны обеспечивать хорошую устойчивость и проходимость робота по любой, даже недоступной каким-либо транспортным средствам, поверхности при автоматическом управлении. Более того, вновь разрабатываемый способ должен давать возможность машине приспосабливаться к передвижению в случае потери одной из конечностей. На генерирование походки не должен затрачиваться большой информационный ресурс, поскольку мобильные автономные машины не оборудованы мощными процессорами, а значит, излишне «сложные» методы будут отрицательно влиять на их быстродействие.

Постановка задачи. Целью работы является первичное формирование концепции шагающего робота, способного автономно вырабатывать алгоритмы управления конечностями и корпусом для реализации эффективного передвижения. Метод перемещения должен удовлетворять условиям внешней среды и внутреннему состоянию робота, обеспечивая при этом высокие показатели устойчивости, быстродействия и проходимости. При этом функции анализа факторов и выбора вида походки робота реализуются внутри бортового вычислителя.

В ходе выполнения исследования решают следующие задачи:

- формирование первичного внешнего вида робота;
- формирование обобщенного алгоритма движения робота;

- разработка основы алгоритма движения шагающей робота;
- разработка системы управления приводами ноги шагающего робота.

Внешний вид шагающего робота. Для реализации разнообразных схем походок, обеспечивающих высокую проходимость статически устойчивых шагающих роботов, число конечностей должно быть не менее шести [5]. Поэтому в качестве прототипа конструкции выбран робот с шестью конечностями или иначе гексапод. Такая конструкция позволит реализовать схемы походок, схожие с таковыми у насекомых и четвероногих животных. Более того, данное решение легче адаптировать при повреждении конечностей, что критично при воссоздании как статических, так и динамических методов перемещения.

Основание робота имеет вид шестиугольного каркаса, на который крепятся обрудование и полезная нагрузка. К каждому углу корпуса подсоединена конечность, являющаяся трехзвенным манипулятором с вращательной системой координат, как показано на рис. 1 [6].

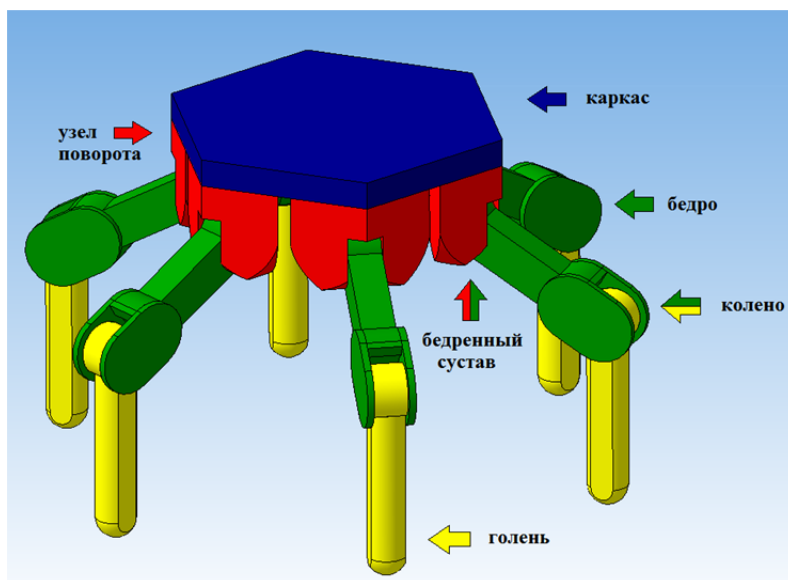


Рис. 1. Первичная конструкция шагающего робота

Звенья ноги связаны сочленениями пятого класса, или шарнирами. Степени свободы ноги изображены на рис. 2.

Первый узел вращает конечность вокруг оси, перпендикулярной плоскости основания. Второй узел, являющийся аналогом бедренного сустава, контролирует параметры поворота бедра, т. е. третьего звена, относительно корпуса. Третий узел играет роль колена, т. е. отвечает за вращение голени, конечного звена относительно бедра. Первичная структура силовой части привода, осуществляющего движение в узле, состоит из исполнительного двигателя, при необходимости укомплектованного силовой передачей, и усилительного каскада. Обратная связь реализуется через датчики относительных угловых скорости и координаты [5, 7].

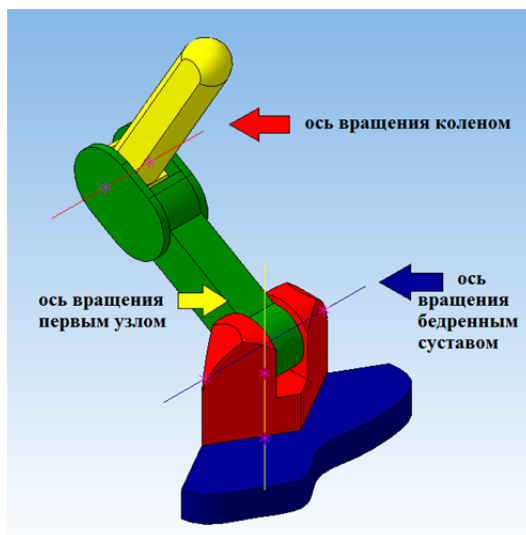


Рис. 2. Первичная модель ноги

Обобщенный алгоритм движения робота. Робот должен обладать автономностью, поскольку большую часть своей активной деятельности осуществляет вдали от оператора. Выбор определенной схемы походки обеспечивает высокую проходимость, но в случае сложного препятствия робота тратит слишком много энергии на реализацию движения, поэтому в алгоритм необходимо ввести прерывание при низком уровне заряда бортового источника питания [8].

Кроме того, следует учесть тот факт, что робот оснащен пультом управления, позволяющим оператору в любое время перехватить управление роботом, что обязывает ввести прерывание по требованию оператора.

Также нужно предусмотреть момент поломки двигателей, а значит, и алгоритм управления в случае, когда приводы вышли из строя или стали неуправляемыми.

Не стоит также забывать о преодолении препятствий, смене плотности почвы, и изменении угла наклона поверхности перемещения. Все эти факторы нужно учесть при реализации алгоритма.

Показанный на рис. 3 алгоритм перемещения определяет, какую схему необходимо выбрать роботу после анализа внешних условий и внутреннего состояния.

Данный алгоритм обладает рядом преимуществ по отношению к современным аналогам. Выбор способа перемещения не так сильно затрачивает вычислительные ресурсы, как, к примеру, при нейросетевом самообучении, что значительно облегчает выбор составляющих бортового вычислителя, методов сокращения времени анализа окружающей среды и внутренних условий робота, реализации движения [9, 10]. Из этого следует, что обеспечение необходимого быстродействия возможно при использовании более простых компонентов микропроцессорной и цифровой техники, поскольку основная часть алгоритма построена на логических преобразованиях. По сравнению с системами, обладающими устойчивыми алгоритмами походки посредством датчиков состояния, необходимая информация для выбора схемы локомоции может быть получена при меньшем количестве измерений внутреннего и внешнего состояния, что положительно сказывается на энергозатратах и сложности компоновки системы.

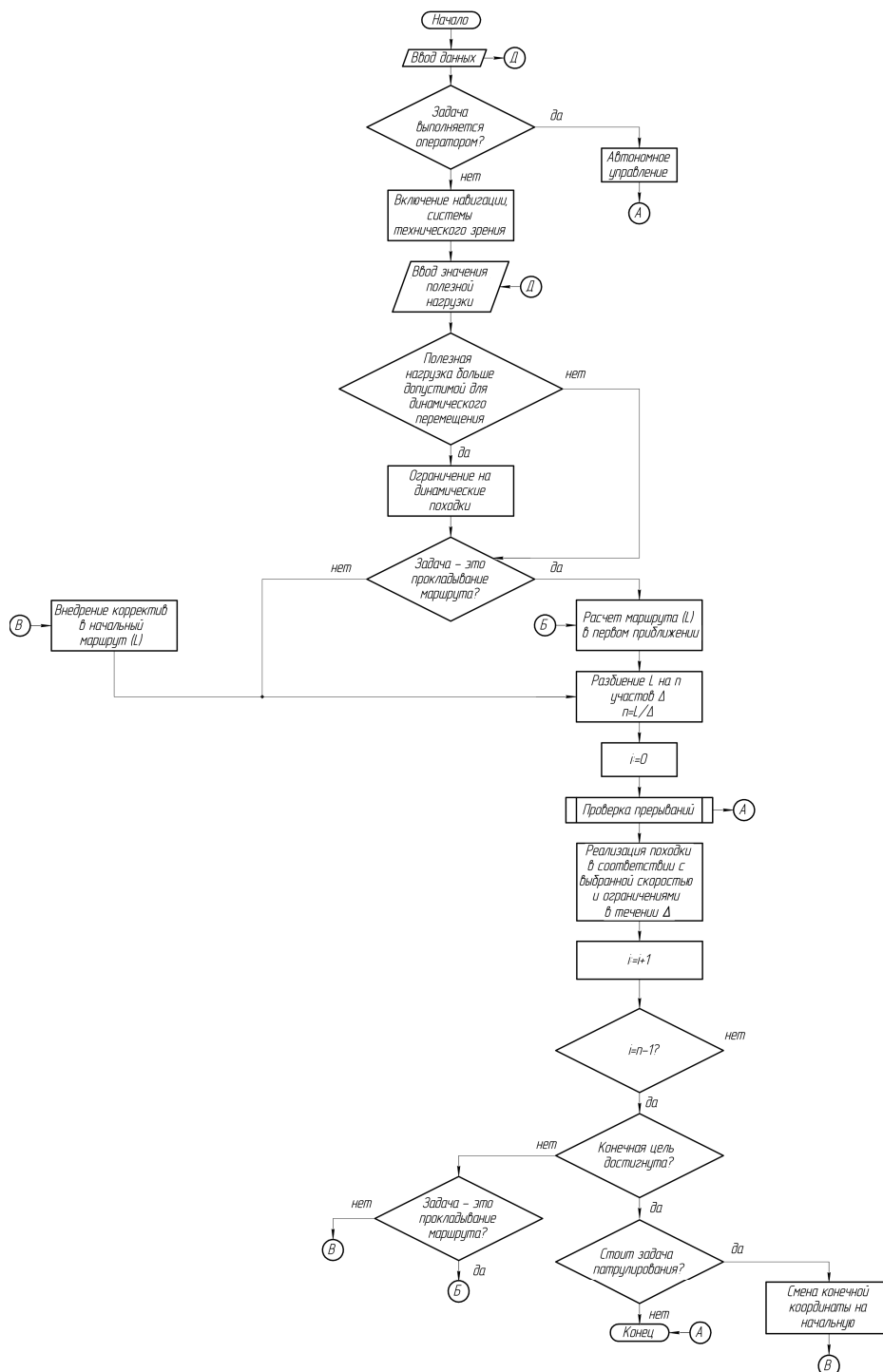


Рис. 3. Блок-схема алгоритма движения робота

Система управления приводами ноги шагающего робота. Первоначально необходимо реализовать систему управления приводами ноги шагающего робота при статическом перемещении в горизонтальной плоскости в максимально нагруженном режиме. Приводы построены на двигателях постоянного тока и датчиках угла поворота вала двигателя. Требуется обеспечить необходимое быстродействие, устойчивость и качество переходного процесса в соответствии с данными, приведенными в таблице.

Исходные данные технического задания

Параметр	Знак	Единица измерения	Бедренный горизонтальный привод	Бедренный вертикальный привод	Коленный привод
Внешний возмущающий момент в динамическом состоянии ноги с учетом запаса	$M_{\text{вн}}^{(U)}$	Н	0,05	1	0,3
Момент инерции нагрузки в динамическом состоянии ноги с учетом запаса	$J_{\text{н}}^{(II)}$	кг · м ²	0,011	0,011	0,002
Номинальная скорость двигателя	$n_{\text{д.н}}$ [$\omega_{\text{ном}}$]	об/мин [рад/с]	4110 [430,398]	4110 [430,398]	3400 [356,047]
Необходимая скорость вращения выходного вала привода	$\omega_{\text{н}}$	град/с [рад/с]	45 [0,7854]	Необходимая скорость вращения выходного вала привода	$\omega_{\text{н}}$
Необходимое ускорение вращения выходного вала привода	$\varepsilon_{\text{н}}$	град/с ² [рад/с ²]	135 [2,3562]	Необходимое ускорение вращения выходного вала привода	$\varepsilon_{\text{н}}$
Допустимая ошибка	E	град [рад]	1 [0,01745]	Допустимая ошибка	E
Допустимое время переходного процесса	$t_{\text{п.п}}$	с	0,5	Допустимое время переходного процесса	$t_{\text{п.п}}$
Допустимое перерегулирование	G	%	10	Допустимое перерегулирование	G
Чувствительность датчика тока	S	В/А	0,075	Чувствительность датчика тока	S
Напряжение при нулевом токе	$U_{\text{н.т}}$	В	1,5	Напряжение при нулевом токе	$U_{\text{н.т}}$
Ограничение угла выходного вала	α	град [рад]	± 150 [$\pm 2,618$]	Ограничение угла выходного вала	α

Редукторы были упрощены до усилительных звеньев, т. е. в них отсутствует момент инерции и КПД равен единице.

Для построения математической модели системы введем ряд допущений, основанных на упрощении моделей двигателя, редуктора, каскада управления. Нелинейности в этих объектах не учитываются, как и момент сопротивления нагрузки [7]:

$$R_{\Sigma} = R_{я} + R_{дат} + R_{DS(on)};$$

$$U = R_{\Sigma} I_{я} + K_{\omega} \omega + L_{я} \frac{dI}{dt};$$

$$U - K_{\omega} \omega = (R_{\Sigma} + L_{я} p) I_{я};$$

$$I_{я} = \frac{1}{R_{\Sigma}} \frac{U - K_{\omega} \omega}{1 + \frac{L_{я}}{R_{\Sigma}} p};$$

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{\Sigma}};$$

$$I_{я} = \frac{M}{K_M} \Rightarrow M = I_{я} K_M;$$

$$\begin{aligned} M &= \frac{M_T}{i\eta} + (J_{я} + J_{ред}) i \varepsilon_{н} = \frac{J_{н} \varepsilon_{н}}{i\eta} + (J_{я} + J_{ред}) i \varepsilon_{н} = |i \varepsilon_{н} = \varepsilon_{д}| = \\ &= \frac{J_{н} \varepsilon_{д}}{i^2 \eta} + (J_{рот} + J_{ред}) \varepsilon_{д} = \varepsilon_{д} \left(J_{рот} + J_{дат} + J_{ред} + \frac{J_{н}}{i^2 \eta} \right); \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{д} = \frac{1}{J_{рот} + J_{дат} + J_{ред} + \frac{J_{н}}{i^2 \eta}} M;$$

$$J_{\Sigma} = J_{я} + J_{дат} + J_{ред} + \frac{J_{н}}{i^2 \eta};$$

$$\varepsilon_{д} = \omega_{д} p; \quad \omega_{д} = \alpha_{д} p; \quad K_M = \frac{M_{д.н}}{I_{я.н}}.$$

Для определения K_{ω} пренебрежем значением $L_{я}$:

$$U_{я.н} = R_{я} I_{я.н} + K_{\omega} \omega_{ном};$$

$$K_{\omega} = \frac{U_{я.н} - R_{я} I_{я.н}}{\omega_{ном}}.$$

Расчет всех параметров осуществляется в программном пакете MATLAB. В подпрограмме Simulink реализуется на основании уравнений модель двигателя, показанная на рис. 6 [7].

Модель датчика тока примет вид, представленный на рис. 7.

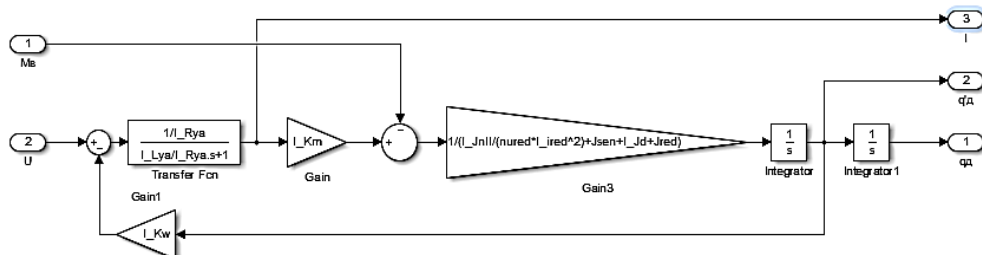


Рис. 6. Математическая модель двигателя

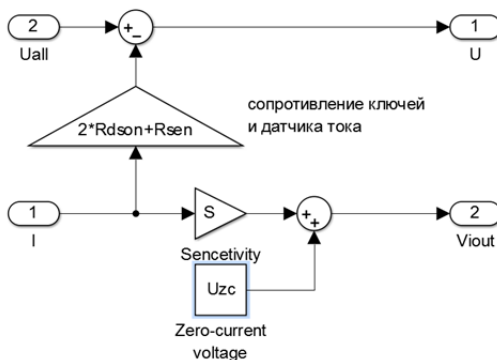


Рис. 7. Математическая модель датчика тока

В упрощенной модели датчика учитывается влияние сопротивления усилителя мощности и самого датчика тока. Посредством преобразования с коэффициентом S ток в якорной цепи переходит в напряжение на выходе.

Энкодер, установленный на вал, измеряет угловое положение вала и формирует обратную связь по координате. Также вводится ограничение входного воздействия на усилитель мощности до 6,5 В из-за технических возможностей источника питания.

Результующая модель привода показана на рис. 8.

Формулы для вывода передаточной функции двигателя имеют следующий вид:

$$W_{\text{двигателя}} = \frac{1}{R_{\Sigma}} \frac{K_M}{T_3 p + 1} \frac{1}{J_{\Sigma}} \frac{1}{p} = \frac{K_M}{R_{\Sigma}} \frac{1}{J_{\Sigma} p (T_3 p + 1)}; \quad W_{\text{двигателя}} = \frac{1}{1 + T_M p + T_M T_3 p^2} = \frac{L\{\omega_d\}}{L\{U\}},$$

$$W_{\text{двигателя}}^{\text{разомкнут}} = \frac{L\{\alpha_d\}}{L\{U\}} = \frac{1}{1 + T_M p + T_M T_3 p^2} \frac{1}{K_{\omega} p}.$$

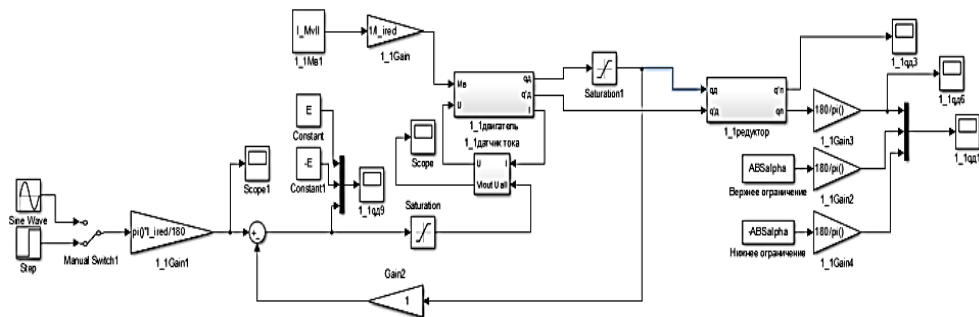


Рис. 8. Структурная схема привода с единичной обратной связью по угловой координате

После анализа разработанных математических моделей в MATLAB получены передаточные функции линейных частей имеющихся математических моделей:

$$W_I^{(II)} = \frac{102,3}{3,324 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + 0,02553 p^2 + p};$$

$$W_{II}^{(II)} = \frac{102,3}{3,324 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + 0,02553 p^2 + p};$$

$$W_{III}^{(II)} = \frac{84,73}{2,238 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + 0,01719 p^2 + p}.$$

Модель с обратной связью по углу без коррекции необходимо проанализировать на устойчивость, точность и качество переходного процесса. Для этого приведем передаточную функцию разомкнутой системы к стандартному виду.

$$W_1^{(III)} = \frac{102,3}{p(0,025399 p + 1)(0,000131 p + 1)}.$$

Частота смены наклона определяется следующим образом:

$$T_1 = 0,025399 \text{ с} \Rightarrow \omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,025399} = 39,3716 \text{ с}^{-1};$$

$$T_2 = 0,000131 \text{ с} \Rightarrow \omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,000131} = 7633,5878 \text{ с}^{-1};$$

$$20 \lg K_{н.ч} = 20 \lg 102,3 = 40,1975 \text{ дБ};$$

$$W_{II}^{(III)} = \frac{102,3}{p(0,025399 p + 1)(0,000131 p + 1)}.$$

Частота смены наклона определяется следующим образом:

$$T_1 = 0,025399 \text{ с} \Rightarrow \omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,025399} = 39,3716 \text{ с}^{-1};$$

$$T_2 = 0,000131 \text{ с} \Rightarrow \omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,000131} = 7633,5878 \text{ с}^{-1};$$

$$20\lg K_{н.ч} = 20\lg 102,3 = 40,1975 \text{ дБ};$$

$$W_{III}^{(II)} = \frac{84,73}{p(0,017059p+1)(0,000131p+1)}.$$

Частота смены наклона определяется следующим образом:

$$T_1 = 0,017059 \text{ с} \Rightarrow \omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,017059} = 58,6201 \text{ с}^{-1};$$

$$T_2 = 0,000131 \text{ с} \Rightarrow \omega_2 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,000131} = 7633,5878 \text{ с}^{-1};$$

$$20\lg K_{н.ч} = 20\lg 84,73 = 38,5607 \text{ дБ}.$$

При подаче гармонического сигнала на вход замкнутой системы получим в программном пакете MATLAB график ошибки [7]:

$$g(t) = A \sin(\omega_p t); \quad g'(t) = A \omega_p \cos(\omega_p t); \quad g''(t) = -A \omega_p^2 \sin(\omega_p t);$$

$$\max(g'(t)) = A \omega_p = \omega_n = 0,7854 \text{ рад/с};$$

$$\max(g''(t)) = A \omega_p^2 = \varepsilon_n = 2,3562 \text{ рад/с}^2;$$

$$\omega_p = 3 \text{ рад/с}; \quad A = 0,2618 \text{ дБ}.$$

Результаты моделирования показывают, что системы не проходят по точности, значит необходимо синтезировать дополнительные подсистемы коррекции.

Реализовав ЛАФЧХ разомкнутой системы в программном пакете MATLAB при использовании дополнительного программного обеспечения Simulink и интерфейса Control Analysis [14], можно провести анализ ее устойчивости.

Для наглядной реализации переходного процесса в пакете MATLAB и использовании дополнительного программного обеспечения Simulink [14] на вход замкнутой системы посылаем единичный постоянный сигнал. По полученным результатам моделирования можно сделать вывод о том, что система не проходит по перерегулированию, но удовлетворяет критерию быстродействия. Следовательно, необходима коррекция системы по перерегулированию [8].

В качестве корректирующего устройства введем ПИД-регулятор. Воспользуемся методом Зиглера — Никольса для его настройки. Изначально необходимо установить все коэффициенты ПИД-регулятора в ноль. Затем необходимо повышать коэффициент P до тех пор, пока не появятся незатухающие колебания в системе. Далее сохраняем значения коэффициента $P_{авт}$ и периода автоколебаний $T_{авт}$.

Для расчета коэффициентов ПИД-регулятора по методу Зиглера — Никольса воспользуемся следующими формулами:

$$P = 0,6P_{авт};$$

$$Int = 2 \frac{P}{T_{авт}};$$

$$D = P \frac{T_{авт}}{8};$$

$$P_1 = P_2 = 0,6P_{авт1} = 0,6 \cdot 76 = 45,6;$$

$$Int_1 = Int_2 = 2 \frac{P_1}{T_{авт1}} = 2 \frac{45,6}{0,011} = 8290,9091;$$

$$D_1 = D_2 = P_1 \frac{T_{авт1}}{8} = 45,6 \cdot \frac{0,011}{8} = 0,0627;$$

$$P_3 = 0,6P_{авт3} = 0,6 \cdot 91 = 54,6;$$

$$Int_3 = 2 \frac{P_3}{T_{авт3}} = 2 \frac{54,6}{0,009} = 12133,3333;$$

$$D_3 = P_3 \frac{T_{авт3}}{8} = 54,6 \cdot \frac{0,009}{8} = 0,061425.$$

При подстановке в ПИД-регулятор коэффициентов анализ системы показал, что системы не удовлетворяют техническому заданию по перерегулированию и быстродействию. Поэтому воспользуемся ручной настройкой при помощи программного пакета MATLAB [14].

После введения подсистемы коррекции система примет вид, изображенный на рис. 9.

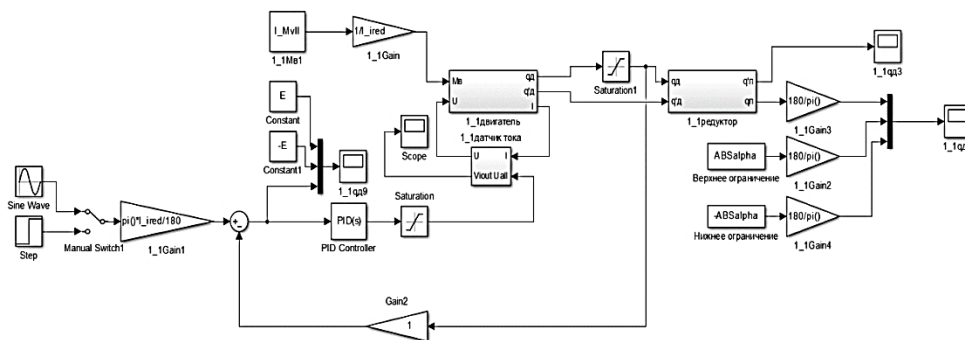


Рис. 9. Математическая модель скорректированного привода с единичной обратной связью по угловой координате

При подаче гармонического сигнала $g(t) = A \sin(\omega_p t)$ на вход получим в программном пакете MATLAB график ошибки [14].

Из результатов моделирования следует, что максимальное значение установившейся ошибки

$$E_{\max}^I = 0,00107 \text{ рад};$$

$$E_{\max}^{II} = 0,0125 \text{ рад};$$

$$E_{\max}^{III} = 0,00391 \text{ рад}.$$

Это означает, что нелинейная система удовлетворяет техническому заданию по точности.

Реализовав ЛАФЧХ разомкнутой системы в программном пакете MATLAB при использовании дополнительного программного обеспечения Simulink и интерфейса Control Analysis [14], можно убедиться в ее устойчивости.

Система обладает необходимыми запасами устойчивости по амплитуде и фазе.

Для наглядной реализации переходного процесса в программном пакете MATLAB при использовании дополнительного программного обеспечения Simulink [15] на вход замкнутой системы посылаем единичный постоянный сигнал. Можно сделать вывод, что система соответствует всем необходимым параметрам:

$$t_{п.п}^I = 0,3452 \text{ с}; \quad G^I = 8,9 \%;$$

$$t_{п.п}^{II} = 0,3320 \text{ с}; \quad G^{II} = 8,0 \%;$$

$$t_{п.п}^{III} = 0,3438 \text{ с}; \quad G^{III} = 8,7 \%.$$

В систему потребуется ввести формирующее прямоугольные импульсы звено:

$$W_{\phi} = \frac{1 - e^{-T\gamma s}}{s},$$

при этом $\gamma = 1$; $1/T = f_{\text{ШИМ}}$ — частота, используемая в ШИМ:

$$f_{\text{ШИМ}} = 15 \text{ кГц} \Rightarrow T = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{15000} = 0,000066 \text{ с}.$$

Модифицированная структурная схема показана на рис. 10.

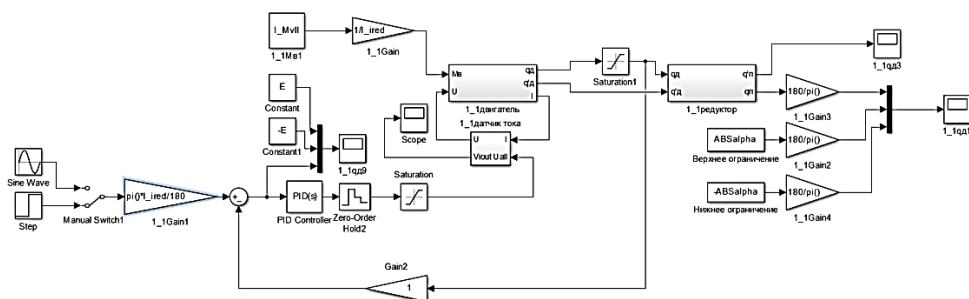


Рис. 10. Математическая модель дискретными корректирующими устройствами

Выводы. В рамках выполняемых исследований был сформирован первичный внешний облик шагающего робота в виде гексапода, сформированы требования к алгоритму локомоции и его общая блок-схема, создана математическая модель приводов и реализована система управления с внедренным корректирующим устройством, обладающая необходимыми значениями быстродействия, устойчивости и точность, а также малым параметром перерегулирования. Моделирование системы управления и ее численная обработка проводились в среде MATLAB и модуле

Simulink. В дальнейшем планируется выполнить исследования по формированию подхода к построению кинематических шаблонов походки, а также сформировать аппарат оптимизационной задачи по выбору конкретных шаблонов в процессе экстремального функционирования.

Литература

- [1] Рубцов И.В., Нестеров В.Е., Рубцов В.И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника. *Микросистемная техника*, 2000, № 1, с. 36–42.
- [2] Cornell University site. URL: <https://news.cornell.edu> (accessed 10.02.2018).
- [3] Kano T., Sato E., Ono T., Aonuma H., Matsuzaka Y., Ishiguro A. *A brittle star-like robot capable of immediately adapting to unexpected physical damage*. *Royal society open science*. 2017. URL: <https://www.rsos.royalsocietypublishing.org> (accessed 10.02.2018).
- [4] Heess N., Dhruva TB, Sriram S., Lemmon J., Merel J., Wayne G., Tassa Y., Erez T., Wang Z., Eslami S.M.A., Riedmiller M., Silver D. Emergence of Locomotion Behaviours in Rich Environment. 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1707.02286.pdf> (accessed 10.02.2018).
- [5] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
- [6] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. *Робототехника*. Москва, Мир, 1989.
- [7] Чемоданов Б.К. (ред.). *Следящие приводы*. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
- [8] Машков К.Ю., Рубцов В.И., Федоренков А.П. Обоснование тактико-технических характеристик наземных мобильных робототехнических средств обеспечения боевых действий Сухопутных войск. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/985.html> (дата обращения 12.02.2018).
- [9] Bongard J., Zykov V., Lipson H. *Resilient Machines Through Continuous Self-Modeling*. 2006. URL: <http://www.science.sciencemag.org/content/314/5802/1118> (accessed 10.02.2018).
- [10] Bongard J. *Morphological change in machines accelerates the evolution of robust behavior*. 2010. URL: <https://www.pnas.org/content/108/4/1234> (accessed 10.02.2018).
- [11] Бесекаровский В.А., Попов Е.П. *Теория систем автоматического управления*. Москва, Наука, 1975.
- [12] Семенов Б.Ю. *Силовая электроника: от простого к сложному*. Москва, СОЛОН-Пресс, 2005.
- [13] International Rectifier. Application Note AN-978. HV Floating MOS-Gate Driver Ics. IR world headquarters, 2007.
- [14] Герман-Галкин С.Г. *MATLAB & SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК: учеб. пособие*. Санкт-Петербург, Корона-Век, 2008.

Сведения об авторах:

Воевода Никита Николаевич — студент кафедры СМ7 «Специальная робототехника и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Лапин Дмитрий Владимирович — аспирант кафедры СМ6 «Ракетные и импульсные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 62-529

Разработка робототехнической системы для покраски поверхности цистерн

© | Голдинова Кристина Алексеевна

spaydervic@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлен способ покраски цистерн с помощью автоматизированной робототехнической системы, состоящей из шестиногого робота и его системы управления. Приведен алгоритм движения робота при покраске. Решена задача адаптации конечностей к поверхностям разной кривизны: на основании математического расчета составлена программа, позволяющая вычислять радиус окрашиваемого объекта по показаниям дальномера и выставлять соответственно ему конечности робота. Выполнено моделирование, подтверждающее правильность расчетов и работы программы.

Ключевые слова: моделирование, робототехническая система, шестиногий робот

Цистерны на стадиях жизненного цикла в процессе производства, эксплуатации и ремонта могут быть неоднократно подвергнуты операции покраски, определяющей внешний облик и некоторые технико-эксплуатационные характеристики.

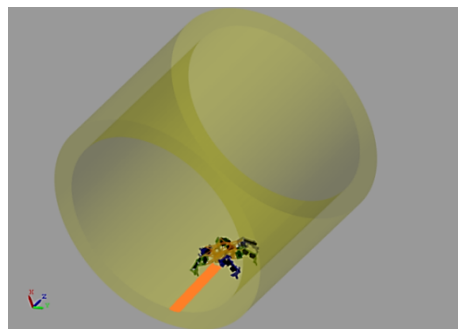
На стадиях производства и ремонта покраска осуществляется в заводских условиях с применением современного технологического оборудования, такого как покрасочные камеры. В данной статье рассматривается способ покраски цистерн с помощью шестиногого шагающего робота.

Перед используемыми в настоящее время способами покраски в процессе эксплуатации он имеет следующие преимущества:

- 1) автоматизация процесса покраски;
- 2) улучшение качества окрашенной поверхности;
- 3) нанесение защитного покрытия в труднодоступных местах;
- 4) обеспечение безопасности работы личного состава при проведении покрасочных операций (рис. 1);



а



б

Рис. 1. Покраска цистерны:

а — работник в спецодежде красит цистерну; б — модель робота с краскопультом в цистерне

5) сокращение расхода материалов;

6) низкая стоимость робота.

Указанный способ также может быть применен в условиях производства.

Построение автоматизированной робототехнической системы. На рис. 2 показан общий вид робота.

Шасси 1 выполнено в виде шести опор, каждая из которых обладает тремя степенями свободы и снабжена электромагнитами 5 на концах. Электромагниты обеспечивают надежное удержание робота на поверхности даже в перевернутом состоянии. Дальномер 3 обеспечивает возможность получать информацию о расстоянии до поверхности для последующего вычисления радиуса системой управления, размещенной внутри корпуса 4 и управляющей положением опор и работой краскопульта 2.

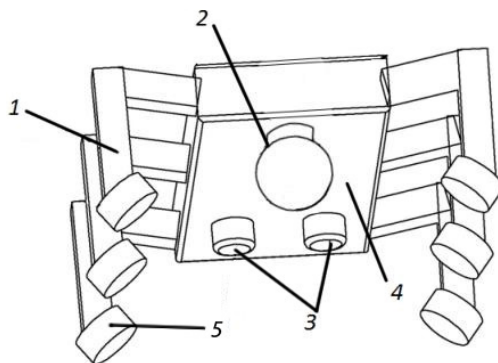


Рис. 2. Общий вид робота:

1 — шасси; 2 — краскопульт; 3 — головная часть с ультразвуковым дальномером; 4 — корпус; 5 — электромагниты

Функциональная схема системы управления представлена на рис. 3. При разработке схемы учтена потребность обеспечения:

- дистанционной связи робота с оператором;
- определения расстояния до окрашиваемой поверхности;
- возможности прошивки микроконтроллера;
- удержания робота на поверхности окрашиваемого изделия;
- раздельного питания логической части системы и исполнительных механизмов (сервоприводов).

Описание алгоритма движения робота. Алгоритм движения робота представлен на рис. 4. Известно [1], что в рамках статической устойчивости и энергоэффективности в случае реализации робота в виде шестиногого аппарата наиболее выгодным является движение так называемой походкой «трешки» [1]. После того как оператор устанавливает робота в начале цистерны и нажимает на пульте кнопку начала работы, конечности переводятся в начальное положение. Магниты в этот момент отключены. Затем дальномер определяет расстояние до необходимых точек и передает сведения на микроконтроллер, который автоматически рассчитывает радиус объекта и отображает его на дисплее оператора. Минимальный радиус кривизны поверхности $R = 0,25$ м выбран исходя из размеров магнитов и габаритов робота. В случае допустимого радиуса на приводы подаются сигналы управления, которые поворачивают звенья ног таким образом, чтобы плоскость магнита совпала с касательной

окружности объекта в центре области контакта. Это необходимо, чтобы обеспечить наибольшую площадь соприкосновения. После этого на электромагниты подается напряжение и затем снимается на каждом шаге движения для тройки ног, которые находятся в фазе переноса. Подача краски в краскопульт осуществляется на каждом шаге при переносе корпуса.

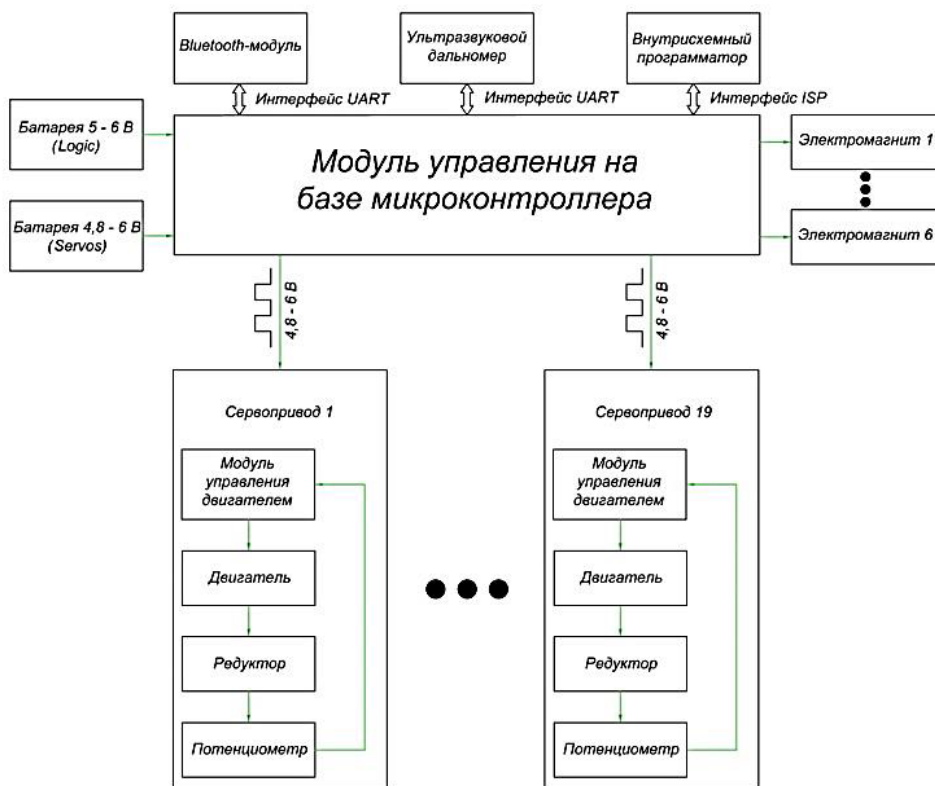


Рис. 3. Функциональная схема системы управления

После каждого шага вперед дальномер проверяет, что расстояние до окрашиваемой поверхности, измеренное в начале пути, не изменилось, то есть поверхность не закончилась и можно делать следующий шаг. Дойдя до края объекта, чтобы не осуществлять разворот, робот движется боком линейно, а потом начинает идти обратно на количество шагов, посчитанное при походе вперед. Затем он опять движется боком и направляется вперед. Так продолжается до тех пор, пока количество боковых передвижений не достигнет нужного значения $k_{\text{бок,доп}}$, т. е. пока робот не покрасит всю поверхность:

$$k_{\text{бок,доп}} = 2\pi R [\text{м}] / 0,1,$$

где 0,1 — коэффициент, определяемый габаритами робота.

При разработке алгоритма принято, что поверхность непрерывна.

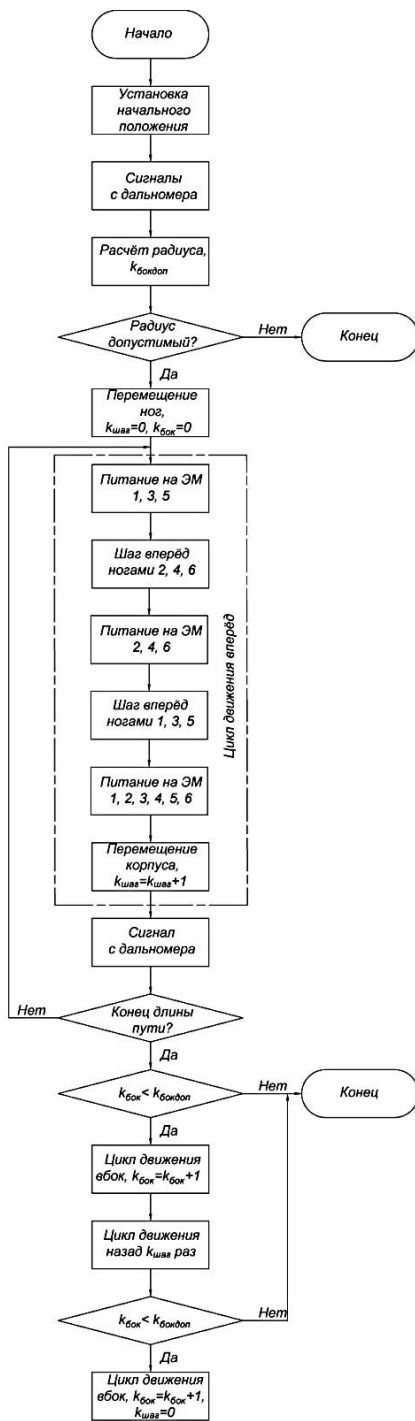


Рис. 4. Алгоритм движения робота

Расчет радиуса окрашиваемого объекта по показаниям дальномера. Расчет необходимо производить для двух случаев: при нахождении на внутренней и внешней поверхности цистерны. При нахождении на внутренней поверхности дальномер определяет расстояние до трех точек поверхности: нижней (H) и двух боковых (L) (рис. 5). При передвижении по внешней поверхности расчет радиуса основывается на одном показании дальномера (до нижней точки) и геометрических параметрах робота (рис. 6).

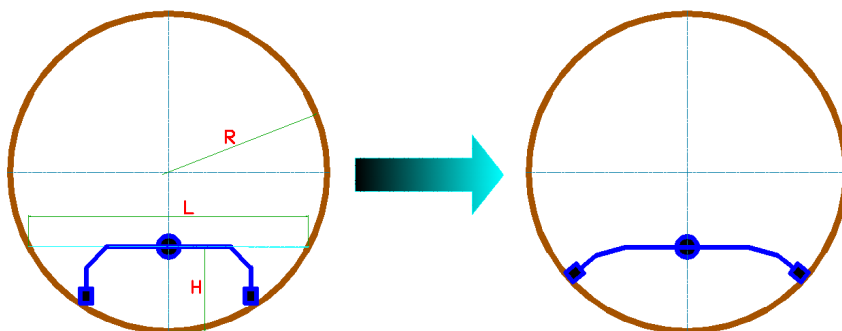


Рис. 5. Процесс перестановки ног на внутренней поверхности

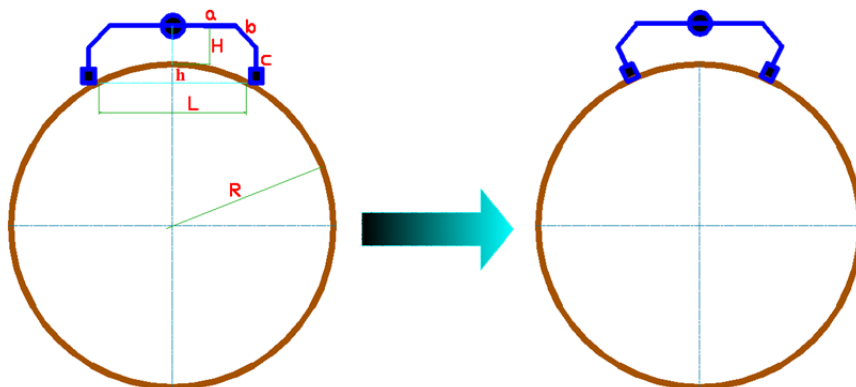


Рис. 6. Процесс перестановки ног на внешней поверхности

Расчет для внутренней поверхности:

$$R = \frac{L^2 + 4H^2}{8H}.$$

Расчет для внешней поверхности:

$$L = 2 \left(a + \frac{b}{\sqrt{2}} \right);$$

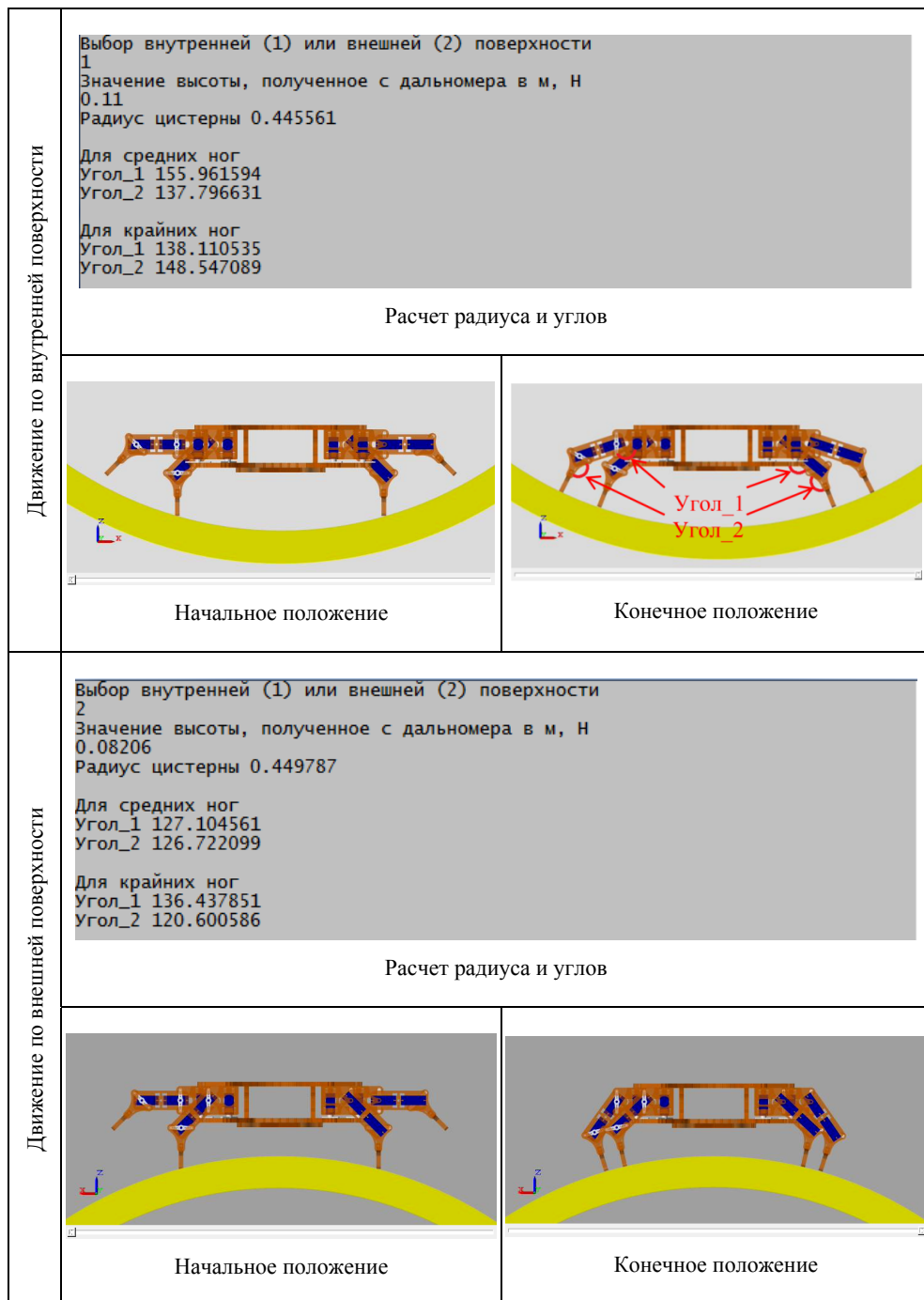


Рис. 11. Результат работы программы и визуальное представление виртуальной динамической модели

Выводы. В данной статье была решена задача покраски цистерн с помощью робототехнической системы. Такой способ позволяет обслуживать изделия в процессе их эксплуатации, не прибегая к их отправке на завод-изготовитель.

В результате проделанной работы:

- спроектирована робототехническая система: робот и система управления;
- разработан алгоритм движения робота при покраске;
- проведены математические расчеты, правильность которых подтверждена моделированием.

Предлагаемая реализация робототехнической системы подразумевает возможность дальнейшего развития и расширения областей применения, например, замена краскораспылителя на другие модули, необходимые при эксплуатации изделий, такие как портативные анализаторы качества поверхности, датчики утечек газа в трубопроводах и видеокамеры.

Литература

- [1] Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. *Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата*. Москва, Наука, 1984, 312 с.
- [2] Мусалимов В.М., Заморуев Г.Б., Калапышина И.И., Перечесова А.Д., Нуждин К.А. *Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics): учеб. пособие для вузов*. Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2013, 114 с.

Сведения об авторе:

Голдинова Кристина Алексеевна — магистрант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 681.142.2

Обобщенная методика оценки показателей качества электрорадиоаппаратуры в среде MATLAB

©	Гоношилов Дмитрий Сергеевич	diman3107@gmail.com
	Сергеева Наталья Алексеевна	SNataliaA@yandex.ru
	Соловьев Владимир Анатольевич	volodimer@list.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведены анализ и классификация основных противоречий, которые возникают при оценке показателей качества электрорадиоаппаратуры (ЭА) в среде MATLAB. Основное внимание уделено исследованиям методов оценки показателей качества изделий ЭА, параметры которых могут отклоняться от нормы. Данный подход с использованием инструментария среды MATLAB позволяет визуализировать проблемы и подходы к их решению. Кратко проанализирована концепция управления качеством, позволяющая повысить качество закупаемого сырья и комплектующих изделий, что приводит к общему снижению затрат на сырье и рабочую силу, а также к повышению качества производимой продукции. Даны рекомендации по разработке специального программного обеспечения. Сформулированные принципы оценки показателей качества ЭА позволяют использовать приведенную методику в различных условиях. На основе обрабатываемой информации предлагаемые решения позволяют классифицировать состояние ЭА, прогнозировать показания и самостоятельно принимать решения о наличии регистрируемого события.

Ключевые слова: управление качеством, показатели качества, MATLAB

Введение. Основопологающим критерием жизнеспособности любого предприятия на рынке является качество его продукции. Без реализации сквозного контроля и управления качеством невозможно обеспечения высоких технико-экономических показателей деятельности предприятия [1].

Жизненный цикл изделия имеет циклический характер в соответствии с циклом Деминга. При переходе от одного этапа жизненного цикла к последующему затраты на корректировку могут изменяться на порядок. В классической литературе [2, 3] такое изменение затрат получило название «правило 10-кратных затрат» (рис. 1).

На этапе производства статистический контроль производства (Statistical Process Control — SPC) является важнейшим инструментом, позволяющим выявить источники изменчивости процесса и отслеживать его таким образом, чтобы предотвращать появление новых источников ухудшения процесса [5]. Процесс производства начинается с входного контроля качества материалов и комплектующих изделий. Внедрение статистических методов контроля на этапе входного контроля на производстве позволит снизить затраты на все последующие контрольные мероприятия и обеспечит следующие улучшения на этапе производства [6]:

- повышение качества закупаемого сырья и комплектующих изделий;
- экономия сырья и рабочей силы;
- повышение качества производимой продукции;

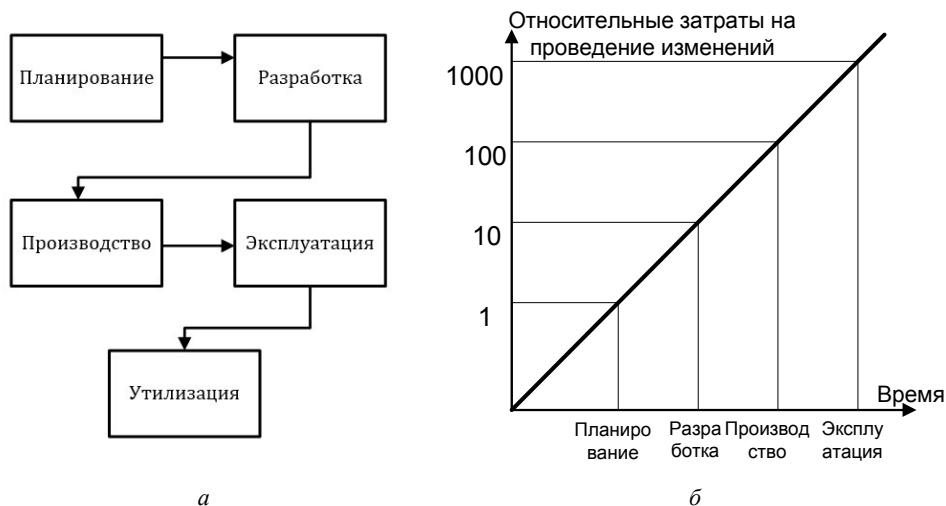


Рис. 1. Жизненный цикл изделия (а) и правило 10-кратных затрат (б)

- снижение количества брака;
- снижение затрат на проведение контроля;
- улучшение взаимосвязи между производством и потребителем.

Далее в статье рассматривается реализация инструментов входного статистического контроля качества по альтернативному признаку электронной аппаратуры в среде MatLab [7–11].

1. Анализ процедур статистического управления качеством электронных средств. В общем случае *статистический* контроль — это процесс установления соответствия между состоянием объекта и заданными на него нормами. Контролем охватываются все этапы производства электронных средств (ЭС).

Главный принцип управления качеством — в основе принятия решений должны быть только факты. Поэтому сбор и обработка фактов — важнейший процесс управления качеством. Реализация этого процесса во многом определяется используемыми инструментами, поэтому именно их автоматизации уделяется наибольшее внимание. Всего различают семь инструментов управления качеством (СИУК) [5]:

- контрольный листок;
- гистограмма;
- диаграмма разброса;
- диаграмма Парето;
- расслоение (стратификация);
- причинно-следственная диаграмма;
- контрольная карта.

Данные инструменты реализуют презентационный, а не управляющий слой. Их основная задача — мониторинг протекающего процесса (фиксация данных, хранение данных, обработка данных).

При развертывании системы контроля на первый план выходит вопрос их дальнейшей обработки, без использования развитых инструментов визуализации и аналитической обработки даже самые подробные наборы данных становятся бесполезными. Обработываемые данные можно классифицировать следующим образом:

- контроль параметров входных компонентов процесса;
- контроль и регулирование процесса;
- анализ отклонений от требований;
- контроль выходных показателей процесса.

2. Исследование методов оценки управления качеством в среде MATLAB

2.1. Контрольный листок изделия. Контрольный листок является начальным этапом формализации при внедрении автоматизации процедур управления качеством. В начале анализа определяют перечень и допустимые диапазоны значимых параметров компонентов по рассматриваемому изделию для каждого видов контролей (рис. 2, а), а потом для каждого из параметров компонентов составляют индивидуальные контрольные листки (рис. 2, б).

Вид контроля	Тип контроля	Тип параметра	Параметр	Значение	Оценка
Производственный контроль	входной	качественный			
		количеств.			
		количеств.			
	операционный	качественный			
		количеств.			
		функциональный			
	принемочный	качественный			
		количеств.			
		функциональный			
Эксплуатационный контроль	качественный				
	функциональный				

а

Контрольный листок изделия

Код изделия	к002	дата/время	05.2015
Цех	2	Участок	1
Рабочий	Ким	Контролер	Цой
Номер партии	01003	Номер	2

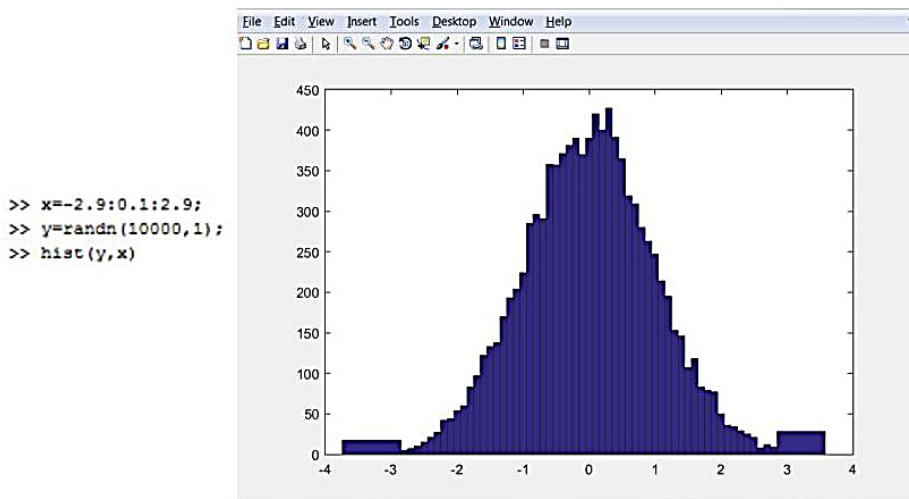
изделие	параметр	значение	оценка	штук в партии
Изделие к002	Сопротивление, Ом	180	критично	3
		185	недопустимо	7
		190	условно допустимо	42
		195	допустимо	130
		200	норма	655
		205	допустимо	116
		210	условно допустимо	40
		215	недопустимо	6
		220	критично	1
		итого:		

б

Рис. 2. Общий вид документов «Контрольный листок формализации исходных данных» (а) и «Контрольный листок изделия» (б)

После проведения необходимых измерений данные заносят в соответствующие графы контрольных листов, тем самым формируя исходный набор показателей для дальнейшего применения инструментов управления качеством.

2.2. Гистограмма. Гистограмма — это инструмент, позволяющий зрительно оценить закон распределения статистических данных, зафиксированные в контрольных листах. На рис. 3, *а* представлен листинг программы построения гистограммы случайных чисел, распределенных по нормальному закону. Результатом выполнения скрипта является график, представленный на рис. 3, *б*.



а

б

Рис. 3. Листинг построения гистограммы в среде MATLAB (*а*) и гистограмма распределения, построенная в среде MATLAB (*б*)

Для реализации указанных инструментов в среде MATLAB можно использовать функцию `hist(...)` — см. рис. 3, *а*.

2.3. Диаграмма разброса. Диаграмма разброса — инструмент, позволяющий определить вид и тесноту связи между парами соответствующих переменных. Для начала следует определить, между какими парами данных необходимо установить наличие и характер связи, затем собрать данные и построить по ним график.

Если диаграммы разброса отражают характер изменения параметров качества во времени при воздействии различных факторов, то по оси *X* откладывают начальные значения параметра качества, а по оси *Y* — значения того же параметра в конечный момент времени. Это отражает динамику изменения параметра во времени (рис. 4). При отсутствии корреляции получаем график, приведенный на рис. 5.

Если все характеристические точки графика будут расположены на одной линии, в пределах допуска, то рассматриваемый процесс можно считать стационарным. Если точки преимущественно будут расположены над биссектрисой, то показатели параметра выросли, если ниже биссектрисы, то снизились.

2.4. Метод расслаивания статистических данных. Метод расслаивания статистических данных — это инструмент, позволяющий провести селекцию (кластеризацию) данных, отражающую требуемую информацию о процессе. Выделяют функ-

циональные группы данных (слои-страты). В производственных процессах такая группировка получила название «5М»: человек (*man*), машина (*machine*), материал (*material*), метод (*method*), измерения (*measurement*).

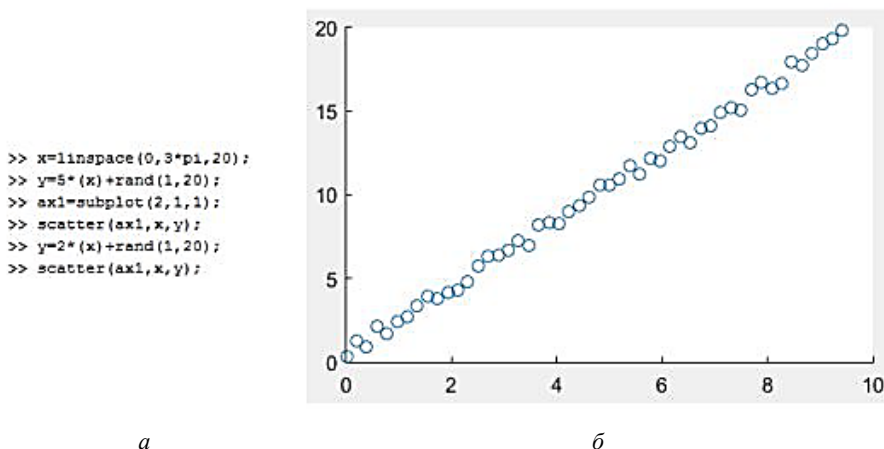


Рис. 4. Листинг обработки данных в программе MATLAB, в результате которого происходит построение диаграммы прямой корреляции (а), диаграмма прямой корреляции, построенная в среде MATLAB (б)

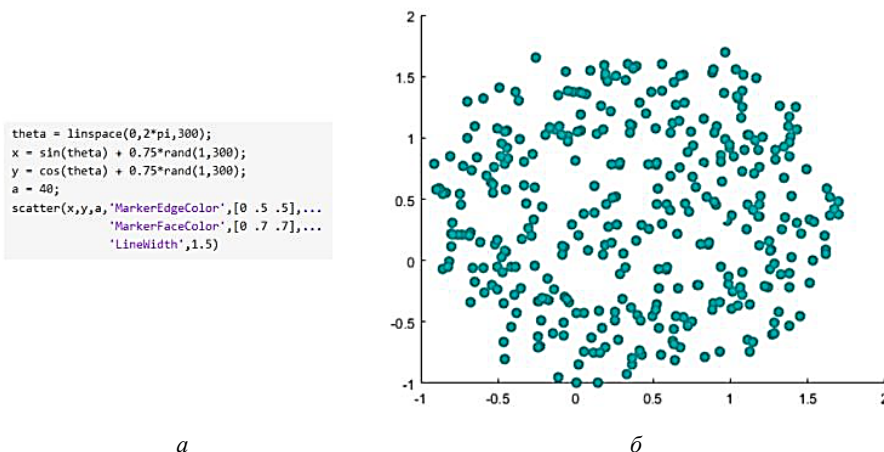


Рис. 5. Листинг обработки данных в программе MATLAB, в результате которого происходит построение диаграммы отсутствия корреляции (а) и диаграмма отсутствия корреляции, построенная в среде MATLAB (б)

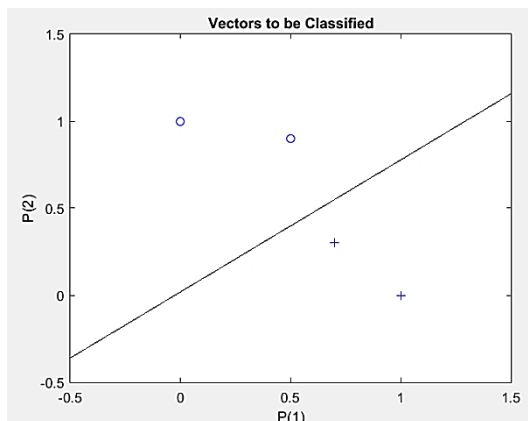
Реализация диаграмм, в которых отличия значений случайных величин, принадлежащих одному кластеру минимальны, может быть реализована с применением встроенных инструментов по кластеризации векторов библиотеки NNTolls MATLAB.

При расслаивании (кластеризации) каждый объект характеризуется набором признаков (x_1, x_2, \dots, x_M), образующих вектор x . Для анализа данных предполагается

заданной выборка $x^{(p)}$, $p = \overline{1, P}$, где p — номер выборочного примера (рис. 8). Выборочные данные образуют несколько кластеров, каждый соотносится со своим прототипом ('o'). Знание прототипов и переход с их помощью к кластерам данных существенно сокращает размерность решаемой задачи и облегчает исследование.

```
>> p=[1 0.7 0 0.5; 0 0.3 1 0.9]
p =
    1.0000    0.7000    0    0.5000
    0    0.3000    1.0000    0.9000
>> t=[1 1 0 0]
t =
    1    1    0    0
>> plotpv(p, t);
>> line = plotpc(net.IW{1}, net.b{1}, line);
>> drawnow;
>> sim(net, [0;0])
>> sim(net, [1;0])
>> sim(net, [0;1])
>> sim(net, [1;1])
```

a



б

Рис. 6. Примеры листинга кода (a) и графика кластеризации в проекции на плоскость X_1X_2 (б)

На рис. 6 представлены результаты кластеризации в проекции на плоскость X_1X_2 , полученные с помощью нейронной сети из пакета NNTools MATLAB.

2.5. Диаграмма Парето. Диаграмма Парето — это инструмент, позволяющий выявить основные причины проблем и продумать план по их разрешению.

На первом этапе определяются характерные проблемы предметной области. Следующим этапом формируются статистические выборки по каждому фактору. После оценки значимости факторов основные усилия направляются на наиболее весомые факторы.

Построение диаграммы осуществляют в прямоугольной системе координат. Ось абсцисс — факторы в порядке их убывания, ось ординат — показатель вклада фактора в рассматриваемую проблему (рис. 7).

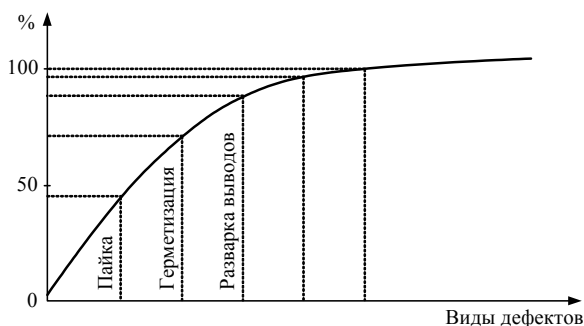


Рис. 7. Общий вид диаграммы Парето

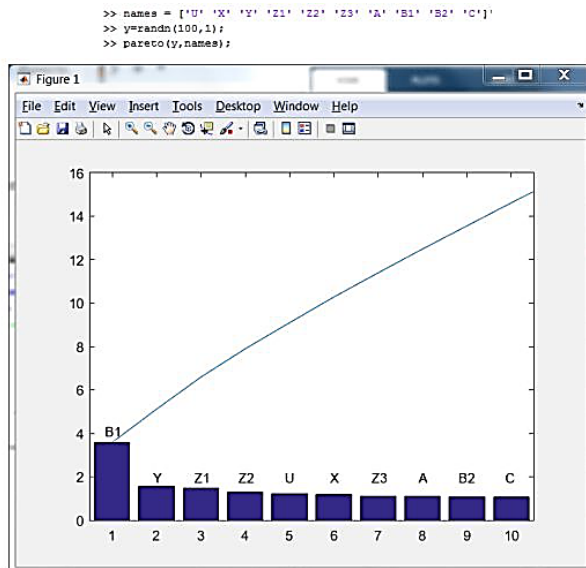


Рис. 8. Листинг для построения диаграммы Парето и диаграмма Парето, построенная в среде MATLAB

Листинг MATLAB, осуществляющий создание диаграммы Парето из десяти фактов по нормальному закону (каждому факту соответствует переменная из массива «names»), показан на рис. 8.

2.6. Причинно-следственная диаграмма. Причинно-следственная диаграмма («рыбий скелет», или схема Исикавы — Сибирякова) позволяет эффективно находить решения в сложных ситуациях и вырабатывать новые идеи, находить существенные факторы, влияющие на конечный результат.

Главную проблему записывают в «голове» рыбы. Далее каждую возникающую идею записывают у «боковых косточек», которые отходят от «хребта» с каждой стороны. «Ребра» можно дополнять идеями в виде мелких косточек (рис. 9).

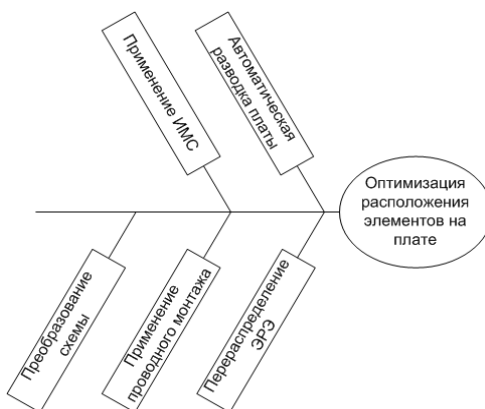


Рис. 9. Пример диаграммы Исикавы — Сибирякова

Эта диаграмма относится к классу визуальных инструментов, не предполагает явную обработку статистических исходных данных и строится средствами классических визуальных редакторов.

2.7. Контрольные карты. Контрольные карты (КК) — это инструмент, позволяющий отслеживать ход протекания процесса и воздействовать на него (с помощью соответствующей отрицательной обратной связи), предупреждая его отклонения от предъявляемых к процессу требований. Выделяют интегральные КК, контролирующие количественные характеристики (размеры, масса и т. д.). Дифференциальные КК, отражают контроль качественных альтернативных дискретных параметров (есть дефект — нет дефекта). Типы КК показаны на рис. 10.

Карты количественные			Карты качественные			
			Число дефектов в выборке		Число дефектных изделий	
$\bar{x}-S$	$\bar{x}-R$	\bar{x}	C	$\frac{u}{P_n}$	P	
n большое	n малое	$n=1$	n постоянное	n разное	n постоянное n разное	

Рис. 10. Типы КК

Контрольные карты отражают стабильность технологического процесса. С использованием данных карт возможна реализация аналитики с позиции динамического предсказания оценки достижения границ допуска и необходимости упреждающих действий. Задание массива карт Шухарта и S -контрольная карта Шухарта в среде MATLAB показаны на рис. 11 и 12.

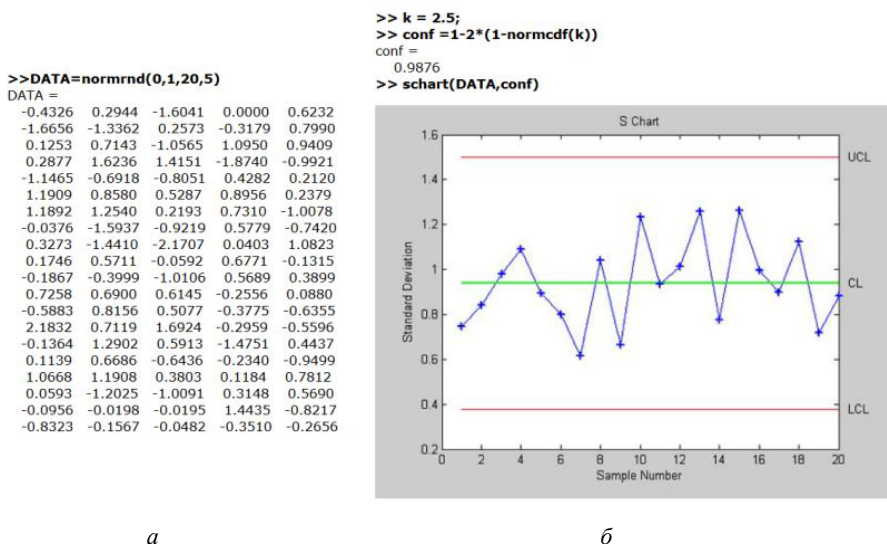
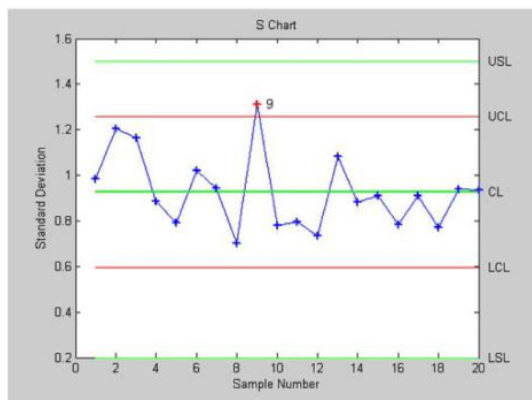


Рис. 11. Примеры массива данных для построения карт Шухарта и листинга программы MATLAB (а) и карта Шухарта, построенная в среде MATLAB (б)

```

>> DATA=normrnd(0,1,20,10);
>> k=1.5;
>> conf =1-2*(1-normcdf(k));
>> specs=[0.2 1.5];
>> [outlier,h] = schart (DATA,conf,specs)
outlier =
     9
h =
    3.0027
   102.0040
   103.0016
   104.0016
   105.0016
   106.0010
   114.0007
   115.0006
    
```

а



б

Рис. 12. Пример листинга программы MatLab (а) и S-контрольная карта Шухарта для контрольных границ $\pm 1,5\sigma$, и границ допусков $LSL = 0,2$; $USL = 1,5$ (б)

Outlier — вектор номеров выборок, вышедших за контрольные границы, h — вектор указателей на объекты графика.

Заключение. Применение инструментария среды MATLAB и табличного процессора Excel обеспечивает наглядность, простоту и доступность обработки и анализа результатов. Диаграммы и гистограммы позволяют визуализировать проблемы и подходы к их решению. Контрольные карты и листки дают возможность осуществлять непосредственный контроль процессов по заданным параметрам в режиме реального времени.

В статье предложены методы автоматизации контроля качества средствами программ MATLAB. Представлены примеры исполняемого кода для реализации семи основных инструментов контроля качества. В совокупности основные инструменты контроля качества позволяют осуществлять контроль и управление процессами, выявляя прежде всего причину возникновения рисков появления ненадлежащего качества продукции.

Литература

- [1] Международный стандарт ISO 9000:2005 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь». Москва, Стандартинформ, 2006.
- [2] Глудкин О.П. (ред.), Горбунов Н.М., Гуров А.И., Юрин О.В. *Управление качеством: учебник для вузов*. Москва, Горячая линия Телеком, 2001, 600 с.
- [3] Маркелов В.В., Кабаева А.С. *Управление качеством электронных средств*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, т. 2, 272 с.
- [4] Маркелов В.В., Власов А.И., Камышная Э.Н. Системный анализ процесса управления качеством изделий электронной техники. *Надежность и качество сложных систем*, 2014, № 1 (5), с. 35–42.
- [5] Власов А.И., Маркелов В.В., Зотьева Д.Е. Управление и контроль качества изделий электронной техники. Семь основных инструментов системного анализа при управлении качеством изделий электронной техники. *Датчики и системы*, 2014, № 8 (183), с. 55–66.
- [6] Маркелов В.В., Камышная Э.Н., Зотьева Д.Е. Методы автоматизации входного статистического контроля при управлении качеством изделий электронной техники. *Информационные технологии в проектировании и производстве*, 2014, № 3 (155), с. 68–84.

- [7] Маркелов В.В., Власов А.И., Зотьева Д.Е. Автоматизация методов входного статистического контроля при управлении качеством изделий электронной техники в среде MATLAB. *Надежность и качество сложных систем*, 2014, № 3 (7), с. 38–43.
- [8] Маркелов В.В., Власов А.И., Зотьева Д.Е. Автоматизация одноступенчатого контроля качества в среде MATLAB. *Надежность и качество сложных систем*, 2015, № 2 (10), с. 34–41.
- [9] Маркелов В.В., Власов А.И., Зотьева Д.Е., Сергеева Н.А. Автоматизация двухступенчатого контроля качества в среде MATLAB. *Тр. междунар. симп. «Надежность и качество»*, 2016, № 1, с. 38–40.
- [10] Маркелов В.В., Власов А.И., Зотьева Д.Е. Автоматизация многоступенчатого контроля качества в среде MATLAB. *Надежность и качество сложных систем*, 2015, № 1 (9), с. 58–62.
- [11] Маркелов В.В., Власов А.И., Зотьева Д.Е., Сергеева Н.А. Автоматизация последовательного контроля качества в среде MATLAB. *Тр. междунар. симп. «Надежность и качество»*, 2016, № 1, с. 282–285.

Сведения об авторах:

Гоношилов Дмитрий Сергеевич — магистрант кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сергеева Наталья Алексеевна — ассистент кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Соловьев Владимир Анатольевич — доцент кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 338.24.01

Применение среды MATLAB для анализа экономической эффективности инвестиционных проектов

© | Крайнов Иван Андреевич

Ivan.Kraynov@exponenta.ru

Московский финансово-промышленный университет «Синергия»,
Москва, 125190, Россия

Статья посвящена анализу в экономической эффективности инвестиционных проектов среде MATLAB с использованием модуля Statistics and Machine Learning Toolbox. Предложены рекомендации по использованию современного высокотехнологичного программного обеспечения MATLAB для инвестиционного анализа.

Ключевые слова: MATLAB, Statistics and Machine Learning Toolbox, инвестиционный анализ

Оценка инвестиционного проекта требуется для выдачи инвестору необходимой информации, которую он будет использовать для принятия решения, касающегося того, инвестировать ли средства в тот или иной вариант проекта или повременить с этим. Критериев оценки проектов довольно много, но среди всего существующего многообразия можно выделить два основных критерия: финансовый и экономический. Каждый из них взаимно дополняет другой.

Финансовый критерий предполагает анализ ликвидности, платежеспособности проекта. Экономический критерий на первое место выдвигает потенциальную способность проекта сохранять ценность средств, вложенных ранее. Экономическую оценку инвестиций проводят с помощью статических и динамических методов. М.В. Кангро утверждает, что в настоящее время существуют простые (статистические) и усложненные (динамические) методы оценки инвестиционных проектов, основанные на теории временной стоимости денег [1].

Несмотря на существующее в настоящее время большое число показателей эффективности, оценка эффективности инвестиционного проекта сопровождается множеством трудностей и проблем. Для всевозможного решения этих проблем или хотя бы части из них разрабатывают и исследуют различные модели, методы и рекомендации к оценке эффективности инвестиционного проекта. Наиболее известными зарубежными методиками являются:

- методика Европейского банка реконструкции и развития (ЕБРР);
- методика фирмы Ernst & Young;
- подходы Всемирного банка;
- метод «затраты-выгоды» (cost-benefit analysis);
- методика Организации Объединенных Наций по промышленному развитию (ЮНИДО).

Первые две методики (ЕБРР и Ernst & Young) в большей степени являются методом разработки бизнес-плана — основного документа инвестиционного планирования. Компания Ernst & Young применяет для оценки эффективности инвестиций скорректированную текущую стоимость (Adjusted present value — APV) [2]. Но показатель APV корректирует чистую приведенную стоимость (Net present value — NPV)

на сумму финансовых расходов на эмиссию акций, выпуском которых занимаются далеко не все организации в России, а также не учитывает риски инвестиций [3]. Микрофинансовые организации имеют три негативных аспекта деятельности — более высокие риски, более высокие процентные ставки и меньшую степень диверсификации портфелей [4]. Поэтому данный способ не является популярным в России.

При применении методики Европейского банка реконструкции и развития от составителя потребуется от составителя наличие солидного опыта в разработке бизнес-планов в целом и оценке эффективности инвестиционных проектов в частности [5].

Всемирный банк подходит к оценке эффективности инвестиционного проекта, опираясь на проектный анализ. Проектный анализ представляет собой методику оценки в большей степени общественной эффективности проекта, нежели коммерческой [6].

Эволюционным путем развития метода «затраты-выгоды» является формирование методики ЮНИДО. В методике «затраты-выгоды» помимо коммерческой эффективности, оценивается также социальная эффективность реализации инвестиционного проекта. Подход ЮНИДО подчеркивает необходимость создания товаров и услуг для потребления как окончательную причину инвестиций, и в соответствии с этим проектные затраты и выгоды измеряются относительно потребления [7].

Также можно адаптировать метод экспертных оценок для анализа экономической эффективности проектов. Применение данного метода позволяет с помощью предварительного анализа рынка и использования математических моделей выявить наиболее экономически выгодные проекты [8].

Во всем мире методики оценки эффективности реальных инвестиций в качестве итоговой оценки предполагают расчет NPV и внутренней нормы доходности (internal rate of return — IRR) [9]. Существует и ряд других показателей для оценки эффективности инвестиций, однако, наиболее популярными являются именно NPV и IRR. Эти выводы следуют из исследований, проведенных в США, Австралии, Китае, Великобритании, Канаде, Нидерландах [9]. В данной работе для анализа эффективности проектов будут рассмотрены четыре параметра: NPV, руб., IRR, %, дисконтированный срок окупаемости (Discounted payback period — DPP), лет, чистая прибыль (Net profit — NP), руб.

В таблице приведены данные о 20 проектах (удачных и неудачных), которые уже были созданы организацией X в узкой специализированной промышленной области. Также есть рассчитанные данные (NPV, IRR, DPP) проекта 21.

Данные инвестиционных проектов

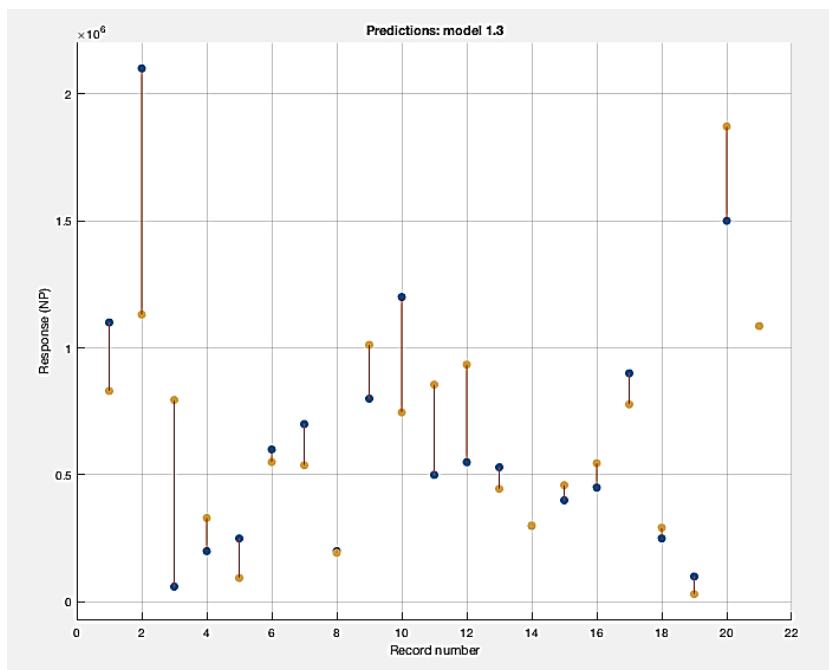
Номер проекта	NP, тыс. руб.	NPV, тыс. руб.	IRR, %	DPP, лет
1	1100	100	88	10
2	2100	110	95	11
3	60	87	65	6
4	200	34	24	3
5	250	16	8	2
6	600	56	33	3
7	700	54	33	4
8	200	24	20	5
9	800	88	80	6
10	1200	90	80	9
11	500	67	62	12

Окончание таблицы

Номер проекта	NP, тыс. руб.	NPV, тыс. руб.	IRR, %	DPP, лет
12	550	77	50	5
13	530	54	50	6
14	300	34	24	4
15	400	45	34	5
16	450	54	43	4
17	900	73	22	8
18	250	27	12	4
19	100	10	2	1
20	1500	128	26	4
21		102	54	3

С помощью среды MATLAB необходимо провести анализ успешности (NP) проекта 21. Полученный результат не является конечным в плане принятия решения. Он лишь отражает экономическое ожидание от данного проекта и служит дополнительной информацией руководству организации или совету директоров при принятии решения. Также отметим, что рассматриваются «идеальные проекты», которые являются аналогичными и не предполагают влияния внешних факторов воздействия.

Для исследования будем применять программное обеспечение MATLAB версии 2018a с использованием модуля Statistics and Machine Learning Toolbox. Обучение системы будет проходить «с учителем». Выбрана модель обучения с наименьшей ошибкой — Linear Regression Robust Linear.



Построение прогнозируемой модели чистой прибыли проектов

На рисунке показана модель прогнозируемой экономической эффективности проектов, включая прогноз проекта 21. Синими точками отмечены введенные нами данные проектов. Желтыми точками показана прогнозируемая NP каждого проекта после обучения системы. Красными линиями для наглядности соединены реальные и прогнозируемые NP в соответствии с обучением системы. Данные линии демонстрируют величину отклонения. Модель предполагает приблизительную чистую прибыль проекта 21, равную 1,1 млн руб. Отметим, что более точно предсказать итоговую доходность проекта можно при рассмотрении больших объемов данных о предыдущих проектах.

Основное внимание в работе уделено рассмотрению выбора финансовых показателей эффективности проектов и применения среды MATLAB для анализа данных проектов при выбранных показателях эффективности. В результате работы было представлено, как с помощью современного инженерного программного обеспечения MATLAB можно осуществлять экономический анализ инвестиционных проектов и строить прогнозируемую модель экономической эффективности проектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект НШ-2781.2012.2) и РФФИ (проект 12-07-00057).

Литература

- [1] Кангро М.В. *Методы оценки инвестиционных проектов: учеб. пособие*. Ульяновск, УлГТУ, 2011, 131 с.
- [2] Савин В.А. Современные и иностранные предприятия в Китае. *Менеджмент в России и за рубежом*, 2003, № 5, с. 117–123.
- [3] *Программа тренинга. Оценка инвестиционных проектов II: сложные вопросы*. Ивановский государственный энергетический университет. URL: http://ispu.ru/files/gost_P_7_0_5_-2008.pdf (дата обращения 12.01.2018).
- [4] Сорокин А.С., Шилов В.А. Многомерный статистический анализ структуры рынка микрофинансирования в России. *Наукоедение*, 2016, т. 8, № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/10EVN11> (дата обращения 12.01.2018).
- [5] Adjusted Present Value (APV). Kaplan Financial Knowledge Bank. URL: [http://kfknowledgebank.kaplan.co.uk/KFKB/Wiki%20Pages/Adjusted%20Present%20Value%20\(APV\).aspx](http://kfknowledgebank.kaplan.co.uk/KFKB/Wiki%20Pages/Adjusted%20Present%20Value%20(APV).aspx) (дата обращения 12.01.2018).
- [6] Лившиц В.Н. Проектный анализ: методология, принятая во Всемирном банке. *Экономика и математические методы*, 1994, т. 30, вып. 3, с. 37–50.
- [7] Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А., Шахназаров А.Г. О методологии оценки эффективности реальных инвестиционных проектов. *Российский экономический журнал*, 2006, № 9–10, с. 63–73.
- [8] *State of the Practice for Cost-effectiveness Analysis (CEA), Cost-Benefit analysis (CBA) and resource allocation*. World Road Association (PIARC), 2012; *Guide to Cost Benefit Analysis of Investment Projects*. DG Regional Policy, European Commission, 2008.
- [9] Реут Д.В., Крайнов И.А. Роль и значение метода экспертных оценок в системе оценивания качества инвестиционных проектов. *Инновации в менеджменте*, 2017, № 3 (13), с. 32–35.
- [10] Боталова А.С., Емельянов А.М. Практика принятия инвестиционных решений в компаниях: зарубежный опыт. *Корпоративные финансы*, 2010. № 2 (14), с. 76–83.

Сведения об авторе:

Крайнов Иван Андреевич — аспирант кафедры «Управление человеческими ресурсами», Негосударственное образовательное частное учреждение высшего образования «Московский финансово-промышленный университет «Синергия»»

УДК 623-1/-8

Идентификация силового привода при неизвестном порядке исследуемого звена

© | Лапин Дмитрий Владимирович
Шавырин Игорь Борисович

lapindv@bmstu.ru
shavirin@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрен классический вопрос идентификации динамических звеньев на основе обработки выходных данных. Предложена обобщенная методика, заключающаяся в представлении модели-кандидата исходной системы в виде динамического звена превосходящего порядка. На численном примере показано, что при таком подходе идентификации звеньев устойчивых линейных звеньев различного порядка, меньшего, чем у модели-кандидата, при неизвестном порядке модели позволяет получить исходную модель звена. Верификация методики проведена на тестовой задаче. Данное решение применено при исследовании таких ответственных систем, как силовые и исполнительные приводы в составе комплексов высокоточного ракетного оружия. В дальнейшем методику планируется модифицировать для работы в том числе с нелинейными звеньями.

Ключевые слова: идентификация, силовые приводы, частотные испытания, линейные динамические системы, неизвестный порядок динамической системы, частотный годограф

Введение. На сегодняшний день требования к элементам переносных зенитных ракетных комплексов в части точности, быстродействия и эффективности достигли крайне высоких значений. При этом критически важным этапом является проверка непосредственно исполнительных силовых приводов системы управления. Для создания эффективного инструмента частотных исследований подобных приводов разработана методика идентификации при неизвестном порядке исследуемого звена.

Постановка задачи. Для синтеза и анализа данных систем необходимо знать их статические и динамические параметры, которые в терминах теории автоматического регулирования отражаются обобщенной передаточной функцией, т. е. системой с сосредоточенными параметрами. Нахождение статических и динамических свойств систем связано с задачей идентификации, т. е. задачей нахождения дифференциальных уравнений, описывающих эти системы. В общем случае в задаче требуется определить не только коэффициенты передаточной функции, но и ее вид, т. е. провести первичный структурно-параметрический синтез системы, описанной в известных терминах дробно-рациональной функции.

Исходные данные. Рассмотрим задачу для звеньев, описываемых передаточной функцией второго порядка и выше. Для представления годографов систем воспользуемся формальной заменой комплексной переменной s на комплекс $j\omega$. Общий вид годографов устойчивых линейных систем, описываемых передаточными функциями указанных порядков, представлен на рис. 1.

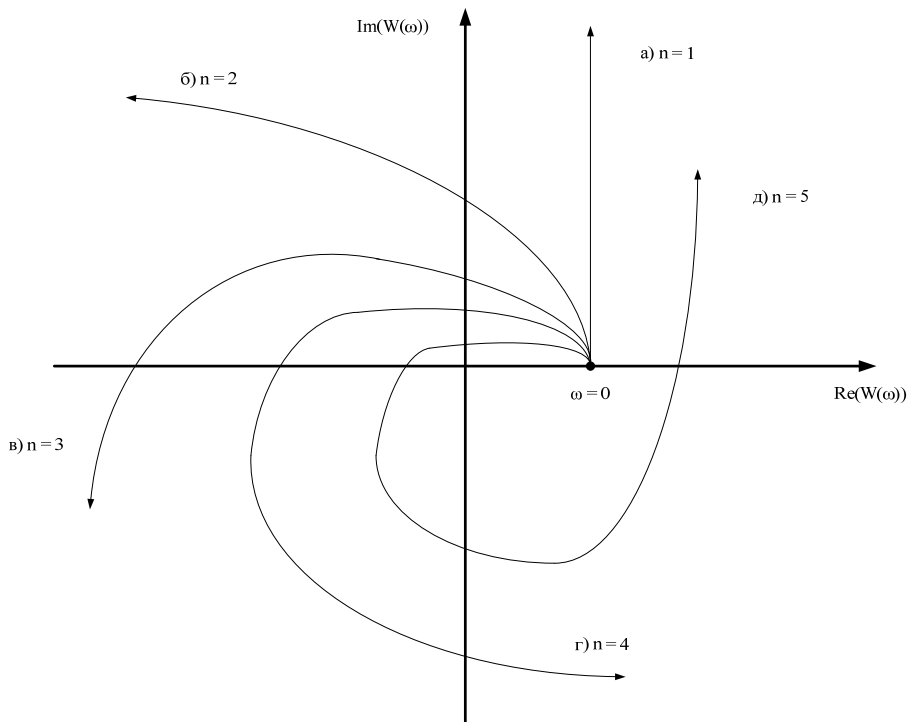


Рис. 1. Схематичные годографы рассматриваемых устойчивых линейных динамических звеньев, описываемых дифференциальным уравнением: *a* — I порядка; *б* — II порядка; *в* — III порядка; *г* — IV порядка; *д* — V порядка

Видим, что в зависимости от порядка звена меняется количество пересекаемых годографом квадрантов при положительном отрезке частот для построения. Воспользуемся этим свойством для нахождения порядка звена по годографу.

Методика решения задачи. Пусть неизвестен порядок исследуемого звена. Найдем решения для модели динамического звена, описанного АФЧХ вида

$$W_m(p) = \frac{b_0 + b_1 j\omega + b_2 (j\omega)^2 + \dots + b_m (j\omega)^m}{a_0 + a_1 j\omega + a_2 (j\omega)^2 + \dots + a_n (j\omega)^n}.$$

Для примера зададимся моделью линейного динамического звена пятого порядка, т. е. $m = 1$, $n = 5$, $b_0 = 1$:

$$W_m(p) = \frac{b_0}{a_0 + a_1 j\omega + a_2 (j\omega)^2 + a_3 (j\omega)^3 + a_4 (j\omega)^4 + a_5 (j\omega)^5}.$$

Используя метод идентификации звеньев, предложенный в [1], получим систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 и a_5 :

$$\begin{aligned}
 & a_0 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) - a_2 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^2 + a_4 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4 = \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} P_i; \\
 & a_1 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4 + a_5 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6 = - \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} Q_i \omega_i; \\
 & a_0 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^2 - a_2 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4 + a_4 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6 = \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} P_i \omega_i^2; \\
 & a_1 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4 + a_3 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6 + a_5 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^8 = - \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} Q_i \omega_i^3; \\
 & a_0 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4 - a_2 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6 + a_4 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^8 = \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} P_i \omega_i^4; \\
 & a_1 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6 + a_3 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^8 + a_5 \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^{10} = - \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} Q_i \omega_i^5.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Систему уравнений (1) приведем к матричному виду, получим:

$$\Psi \vec{a} = \vec{u}, \tag{2}$$

где

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{00} & 0 & \Psi_{02} & 0 & \Psi_{04} & 0 \\ 0 & \Psi_{11} & 0 & \Psi_{13} & 0 & \Psi_{15} \\ \Psi_{20} & 0 & \Psi_{22} & 0 & \Psi_{24} & 0 \\ 0 & \Psi_{31} & 0 & \Psi_{33} & 0 & \Psi_{35} \\ \Psi_{40} & 0 & \Psi_{42} & 0 & \Psi_{44} & 0 \\ 0 & \Psi_{51} & 0 & \Psi_{53} & 0 & \Psi_{55} \end{bmatrix}; \quad \vec{a} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}; \quad \vec{u} = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Нулевые элементы матрицы Ψ и элементы вектора \vec{u} в (3) имеют следующие значения:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{00} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2); & \Psi_{31} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4; \\
 \Psi_{02} &= - \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^2; & \Psi_{33} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6; \\
 \Psi_{04} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4; & \Psi_{35} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^8; \\
 \Psi_{11} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^2; & \Psi_{40} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4; \\
 \Psi_{13} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4; & \Psi_{42} &= - \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Psi_{15} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6; & \Psi_{44} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^8; \\
 \Psi_{20} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^2; & \Psi_{51} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6; \\
 \Psi_{22} &= -\sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^4; & \Psi_{53} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^8; \\
 \Psi_{24} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^6; & \Psi_{55} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (P_i^2 + Q_i^2) \omega_i^{10}; \\
 u_0 &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} P_i; & u_1 &= -\sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} Q_i \omega_i; \\
 u_2 &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} P_i \omega_i^2; & u_3 &= -\sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} Q_i \omega_i^3; \\
 u_4 &= \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} P_i \omega_i^4; & u_5 &= -\sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} Q_i \omega_i^5.
 \end{aligned}$$

Решая матричное уравнение (2), получим выражения для коэффициентов частотной передаточной функции модели звена:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{u_4(\Psi_{02}\Psi_{24} - \Psi_{04}\Psi_{22}) - u_2(\Psi_{02}\Psi_{44} - \Psi_{04}\Psi_{42}) + u_0(\Psi_{22}\Psi_{44} - \Psi_{24}\Psi_{42})}{\Psi_{00}\Psi_{22}\Psi_{44} - \Psi_{00}\Psi_{24}\Psi_{42} - \Psi_{02}\Psi_{20}\Psi_{44} + \Psi_{02}\Psi_{40}\Psi_{24} + \Psi_{20}\Psi_{04}\Psi_{42} - \Psi_{04}\Psi_{22}\Psi_{40}}; \\
 a_1 &= \frac{u_5(\Psi_{13}\Psi_{35} - \Psi_{15}\Psi_{33}) - u_3(\Psi_{13}\Psi_{55} - \Psi_{15}\Psi_{53}) + u_1(\Psi_{33}\Psi_{55} - \Psi_{35}\Psi_{53})}{\Psi_{11}\Psi_{33}\Psi_{55} - \Psi_{11}\Psi_{35}\Psi_{53} - \Psi_{13}\Psi_{31}\Psi_{55} + \Psi_{13}\Psi_{51}\Psi_{35} + \Psi_{31}\Psi_{15}\Psi_{53} - \Psi_{15}\Psi_{33}\Psi_{51}}; \\
 a_2 &= \frac{u_2(\Psi_{00}\Psi_{44} - \Psi_{04}\Psi_{40}) - u_4(\Psi_{00}\Psi_{24} - \Psi_{20}\Psi_{04}) + u_0(\Psi_{20}\Psi_{44} - \Psi_{40}\Psi_{24})}{\Psi_{00}\Psi_{22}\Psi_{44} - \Psi_{00}\Psi_{24}\Psi_{42} - \Psi_{02}\Psi_{20}\Psi_{44} + \Psi_{02}\Psi_{40}\Psi_{24} + \Psi_{20}\Psi_{04}\Psi_{42} - \Psi_{04}\Psi_{22}\Psi_{40}}; \\
 a_3 &= \frac{u_3(\Psi_{11}\Psi_{55} - \Psi_{15}\Psi_{51}) - u_5(\Psi_{11}\Psi_{35} - \Psi_{31}\Psi_{15}) + u_1(\Psi_{31}\Psi_{55} - \Psi_{51}\Psi_{35})}{\Psi_{11}\Psi_{33}\Psi_{55} - \Psi_{11}\Psi_{35}\Psi_{53} - \Psi_{13}\Psi_{31}\Psi_{55} + \Psi_{13}\Psi_{51}\Psi_{35} + \Psi_{31}\Psi_{15}\Psi_{53} - \Psi_{15}\Psi_{33}\Psi_{51}}; \\
 a_4 &= \frac{u_4(\Psi_{00}\Psi_{22} - \Psi_{02}\Psi_{20}) - u_2(\Psi_{00}\Psi_{42} - \Psi_{02}\Psi_{40}) + u_0(\Psi_{20}\Psi_{42} - \Psi_{22}\Psi_{40})}{\Psi_{00}\Psi_{22}\Psi_{44} - \Psi_{00}\Psi_{24}\Psi_{42} - \Psi_{02}\Psi_{20}\Psi_{44} + \Psi_{02}\Psi_{40}\Psi_{24} + \Psi_{20}\Psi_{04}\Psi_{42} - \Psi_{04}\Psi_{22}\Psi_{40}}; \\
 a_5 &= \frac{u_5(\Psi_{11}\Psi_{33} - \Psi_{13}\Psi_{31}) - u_3(\Psi_{11}\Psi_{53} - \Psi_{13}\Psi_{51}) + u_1(\Psi_{31}\Psi_{53} - \Psi_{33}\Psi_{51})}{\Psi_{11}\Psi_{33}\Psi_{55} - \Psi_{11}\Psi_{35}\Psi_{53} - \Psi_{13}\Psi_{31}\Psi_{55} + \Psi_{13}\Psi_{51}\Psi_{35} + \Psi_{31}\Psi_{15}\Psi_{53} - \Psi_{15}\Psi_{33}\Psi_{51}}.
 \end{aligned}$$

Используя метод повышения точности идентификации из [2], будем ограничивать область исследования динамического звена околорезонансной областью.

Применение методики к различным динамическим звеньям. Применим данное решение к звену пятого порядка с заданными коэффициентами ($a_0 = 1$, $a_1 = 3,24$, $a_2 = 5,24$, $a_3 = 5,24$, $a_4 = 3,24$, $a_5 = 1$) без наложенного шума. Годограф представлен на рис. 2.

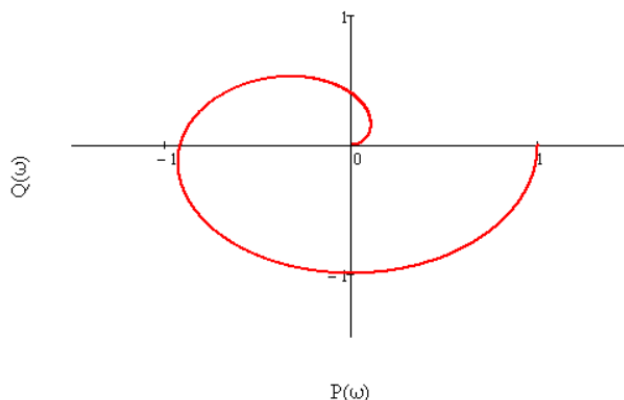


Рис. 2. Годограф линейного динамического звена V порядка

После идентификации получаем модель, идентичную задаваемой. Как видно, коэффициенты передаточных функций полностью совпали. Годограф модели представлен на рис. 3.

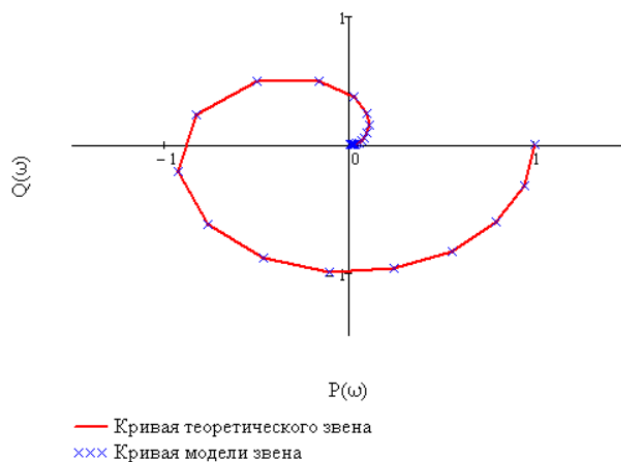


Рис. 3. Годограф модели линейного динамического звена V порядка

При применении данной методики к звену (годографу) меньшего порядка, например к линейному звену второго порядка (с коэффициентами $a_0 = 1$, $a_1 = 0,5$, $a_2 = 0,5$), получаем при идентификации обнуление коэффициентов при степенях выше второй, то есть модель, соответствующую исходной. Ее годограф представлен на рис. 4.

Аналогично применим методику к линейным звеньям III и IV порядка, видим, что коэффициенты при неиспользуемых членах дифференциального уравнения передаточной функции обнуляются.

Далее рассмотрим применение вышеизложенного метода к годографу пятого порядка с наложенным аддитивным шумом. Для получения псевдоэкспериментальных данных для рассматриваемого звена наложим аддитивный шум с помощью датчика

случайных чисел на вещественные и мнимые значения отсчетов годографа. Анализ эмпирических распределений показывает, что частотная характеристика есть сумма детерминированной составляющей (полезный сигнал) и случайных погрешностей, статистически не зависящих от полезного сигнала (шум). Поэтому при статическом анализе примем в качестве квазиэкспериментальной модели сумму полученного сигнала и случайного шума с равномерным законом распределения [1]. На рис. 5 показан искаженный годограф рассматриваемого звена с коэффициентами $a_0 = 1$, $a_1 = 3,24$, $a_2 = 5,24$, $a_3 = 5,24$, $a_4 = 3,24$, $a_5 = 1$ в сравнении с его моделью, для числа псевдоэкспериментальных отсчетов $n_{\text{exp}} = 12$ и значения наложенного шума, равного 10 % значения амплитудно-частотной характеристики в точке, соответствующей частоте $\omega = 0$.

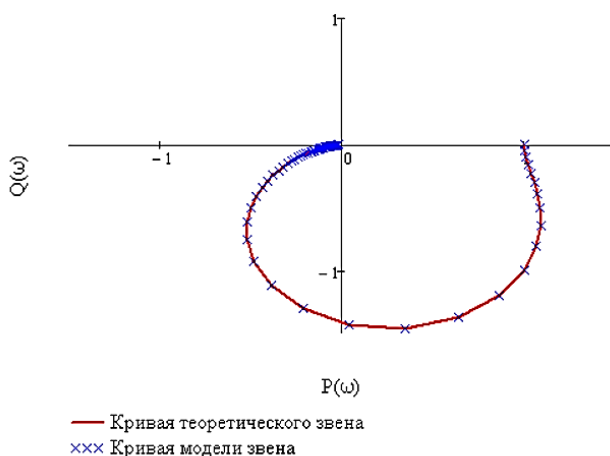


Рис. 4. Годограф идентифицированной модели линейного динамического звена II порядка

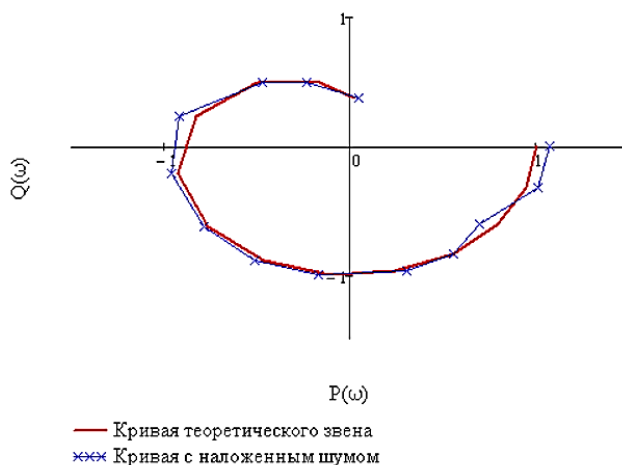


Рис. 5. Годограф звена V порядка с наложенным шумом

После применения методики получим модель звена, представленную на рис. 6.

Таким образом, подтверждается работоспособность методики для решения поставленной задачи по идентификации передаточной функции динамического звена с точки зрения его обобщенной структуры и сосредоточенных параметров.

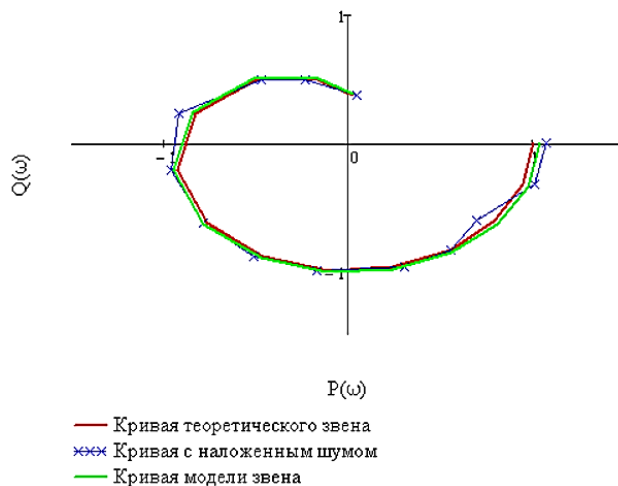


Рис. 6. Годограф модели звена V порядка с наложенным шумом

Выводы. Приведенная в статье методика решения комплексной задачи по идентификации динамических звеньев показала возможность первичного анализа структуры и параметров системы в обобщенном виде передаточной функции. Также был подробно описан порядок ее применения при работе с частотными характеристиками, полученными с помощью численного моделирования. Была подтверждена возможность использования данной методики при неизвестном порядке исследуемого звена. В дальнейшем планируется разработать аналогичную методику для звеньев, содержащих различные типы нелинейностей, таких как сухое или вязкое трение. Основной платформой для интеграции методики в виде конечного программного модуля рассматриваются среды модельно-ориентированного и сквозного проектирования, такие как MATLAB Simulink, SimInTech, Scilab.

Литература

- [1] Боевкин В.И., Недашковский В.М., Павлов Ю.Н. Идентификация линейных динамических звеньев по частотному годографу. *Наука и образование: научное издание*, 2013, № 9. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/618917.html> (дата обращения 01.03.2018). DOI: 10.7463/0913.0618917
- [2] Лапин Д.В., Павлов Ю.Н., Шавырин И.Б., Тихомирова Е.А. Метод повышения точности идентификации при испытании динамических объектов. *Наука и образование: научное издание*, 2015, № 9, с. 215–224. URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/810583.html> (дата обращения 01.03.2018). DOI: 10.7463/0915.0810583
- [3] Жданов А.И., Кацюба О.А. Идентификация по методу наименьших квадратов параметров уравнений авторегрессии при аддитивных ошибках измерений. *Автоматика и телемеханика*, 1982, № 2, с. 29–38.

- [4] Болквядзе Г.Р. Класс моделей Гаммерштейна в задачах идентификации стохастических систем. *Автоматика и телемеханика*, 2003, № 1, с. 42–55.
- [5] Дейч А.И. *Методы идентификации динамических объектов*. Москва, Энергия, 1979, 240 с.
- [6] Тимошенко С.П. *Колебания в инженерном деле*: пер. с англ. Москва, Наука, 1967, 444 с. [Timoshenko S. *Vibration Problems in Engineering*. 3rd ed. D. Van Nostrand Company, Inc. Toronto New York London, 1955. 468 p.].

Сведения об авторах:

Лапин Дмитрий Владимирович — аспирант кафедры СМб «Ракетные и импульсные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Шавырин Игорь Борисович — канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой СМб «Ракетные и импульсные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 681.5.043

Программный контроллер движения на базе системы реального времени с использованием интерфейса связи Ethernet

© | Лобач Артем Юрьевич^{1,2}

lobachart@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», Москва, Зеленоград, 124460, Россия

Рассмотрены подходы к разработке контроллеров движения и выделены принципы их построения на базе операционной системы реального времени с учетом особенностей высокоскоростных интерфейсов связи с исполнительными устройствами (серводрайверами), а также оценены преимущества использования описанного подхода на основе полученных динамических характеристик разработанного контроллера движения.

Ключевые слова: контроллер движения, операционная система реального времени, интерфейс Ethernet, разработка системы управления, динамическая ошибка

Введение. Для решения задач планирования и контроля движения в механических системах на данный момент существуют стандарты, описывающие структуру и функционал систем управления: IEC 61800-7-201/301, CiA 401, CiA 402. Для реализации контроллера движения требуется его функционирование по жестко заданному циклу, связанному с опросом всех датчиков в системе и формированием управляющих сигналов. Существуют следующие способы реализации управления движением по фиксированному циклу:

- использование микроконтроллеров, ПЛИС, работающих по тактовому сигналу и имеющих таймеры и прерывания для реализации циклов управления [1];
- использование цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), обеспечивающих высокоскоростную обработку сигналов. ЦСП программируются с использованием задач и таймеров, что также позволяет реализовать фиксированный цикл управления [2].

Микроконтроллеры, ПЛИС, ЦСП используются в составе аппаратного модуля (устройства), управляющего системой автономно и взаимодействующего с устройством HMI (человеко-машинный интерфейс) через высокоскоростной интерфейс. Наиболее распространенное решение для реализации аппаратного контроллера движения на данный момент — это разработка платы, подключаемой к персональному компьютеру (ПК) или к промышленному компьютеру через интерфейс PCI или VME. Контроллеры движения в таком исполнении выпускают следующие фирмы из числа ведущих в сфере управления движением: Aerotech, Contec, Melec, Googletech, OMS, ADLINK, Delta Tau, Copley Controls.

В 2011 г. на промышленной выставке в Ганновере лидеры мировой промышленности ввели термин «Индустрия 4.0», означающий переход к Четвертой промышленной революции (рост числа «умных» фабрик, повышение степени автоматизации до исключения человека из процесса производства и внедрение интернета вещей в производственные процессы). С этого момента резко увеличилось предполагаемое коли-

чество объектов управления на производстве, появилась необходимость в разработке новых высокоскоростных интерфейсов передачи данных, промышленных сетей с кольцевой структурой. Пример такого интерфейса — EtherCAT фирмы Beckhoff. Интерфейсы такого уровня соединяют различные управляющие устройства в сеть, подчиненную мастер-компьютеру. Высокие скорости обмена требуют от операционной системы мастер-компьютера способность работать в жестком реальном времени. Такой функционал обеспечивают операционные системы реального времени (ОСРВ). ОСРВ — это система, обладающая способностью обеспечить требуемый уровень сервиса в определенный промежуток времени [3]. ОСРВ является высокоуровневым средством реализации задач управления оборудованием.

Производительность персональных и промышленных компьютеров непрерывно растет (за счет многоядерности центральных процессоров и технологии SMP — Symmetric Multi-Processing). Это позволяет отказаться от дополнительных устройств управления и возложить задачи расчетов в реальном времени на процессор компьютера.

Таким образом, возник класс программных контроллеров движения на базе ОСРВ, который целесообразнее использовать с определенным кругом объектов управления. Контроллеры движения по такому принципу выпускают следующие ведущие фирмы: Beckhoff, Codesys, Aerotech, Advanced Motion Control, Elmo, Power Automation, ACS Motion Control.

На данный момент актуальной остается задача описания принципов разработки систем управления движением на базе ОСРВ и с применением высокоскоростных промышленных интерфейсов, а также введение критериев оценки динамических характеристик таких систем.

Требования к быстродействию сервосистем. Быстродействие современных контроллеров движения характеризуется двумя основными параметрами — временем сервоцикла (цикла управления всеми осями перемещения при наличии обратной связи) и числом интерполируемых осей (осей, одновременно включенных в расчет скорости и координаты в текущий момент времени). Ниже приведена таблица с характеристиками контроллеров движения ведущих фирм: российских и зарубежных (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика	Контроллер движения			
	Микрос-12Ф	Aerotech A3200	ADLINK PCIe-8338	ACS SPiiPlusSC
Сервоцикл, мс	1	1	0,5	1
Число осей (интерполируемых)	5	4	8	8

Из табл. 1 видно, что стандартное время сервоцикла — 1 мс, число интерполируемых осей варьируется от 4 до 8 и более. Допустимое количество интерполируемых осей зависит от пропускной способности канала и вычислительных возможностей компьютера (производительность одного ядра процессора, количество ядер процессора). Допустим, что вычислительные способности компьютера достаточно велики для расчета координат и скоростей перемещения для более чем восьми осей (в настоящий момент вычислительных возможностей настольного ПК с установленной на нем системой реального времени хватает для реализации алгоритмов такой сложно-

сти). Тогда величина сервоцикла и допустимое количество осей напрямую зависят от скорости приема-передачи данных в канале связи.

Разрабатываемый контроллер движения работает в комплексе с серводрайвером производства ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура». Серводрайвер принимает управляющее воздействие в формате значения скорости перемещения в текущий момент времени и выдает ответ, содержащий текущую координату оси перемещения. Серводрайвер обеспечивает регулирование по скорости с возможностью настройки ПИ-регулятора. При такой структуре управления осями контроллер должен обеспечивать регулирование по положению всех подключенных к нему осей.

Обмен данными с серводрайверами ведется через интерфейс Ethernet (физический, канальный уровни сетевого стека) по протоколу UDP с заданным форматом посылок (команд управления). Сетевые подключения выполнены по структуре «звезда» через сетевой маршрутизатор. Серводрайвер имеет в своем составе чип-контроллер Ethernet (10BASE-T, 10 Мбит/с), вводящий задержку в цикл приема-передачи данных. Маршрутизатор также имеет задержку трансляции посылок между двумя устройствами.

Для экспериментального определения длины цикла приемопередачи был использован функционал системы реального времени на базе операционной системы Linux. Стандартный пакет Ethernet имеет минимальную длину посылки — 64 байта, что связано с обеспечением возможности определения коллизий во время обмена по сети [4]. Время приемопередачи посылки без полезных данных составил 600...750 мкс. Обмен посылкой максимальной необходимой длины составил 650...800 мкс. При обмене с несколькими устройствами это время увеличивается незначительно (20...30 мкс), поскольку отправка и прием посылок осуществляются параллельно на разных портах протокола UDP.

Исходя из полученных данных и при условии, что расчеты контроллера на каждом сервоцикле занимают не более 150 мкс, была установлена оптимальная по быстродействию продолжительность сервоцикла — 1 мс.

Выбор ОСРВ для реализации контроллера движения. Для реализации программного контроллера движения предварительной задачей был выбор системы реального времени как основы для дальнейшего процесса разработки и тестирования (рис. 1).

Рассмотрен достаточно полный список существующих систем реального времени. Из этого списка были отобраны те системы, которые предназначены для работы с процессорами архитектуры x86. Большинство современных ПК имеют процессоры такого типа, что позволяет использовать полученный программный продукт без представления дополнительных требований к аппаратным компонентам ПК.

Из полученного списка были выделены две группы: ОСРВ, для которых требуется лицензия, и некоммерческие ОСРВ с открытым исходным кодом. Было принято решение об использовании некоммерческих систем с целью увеличить экономическую эффективность от разработки программного контроллера и от проведения исследовательских работ по данной тематике.

Некоммерческие ОСРВ включают в себя небольшое число существующих систем, только четыре из которых предназначены для общих задач (остальные — для применения во встраиваемых системах): Xenomai, RT Linux, RTAI (Real-Time Application Interface), ChronOS.

Для решения поставленных задач была выбрана ОСРВ RTAI ввиду ее распространенности, наличия подробной документации и сетевого сообщества по поддержке проектов на базе RTAI.

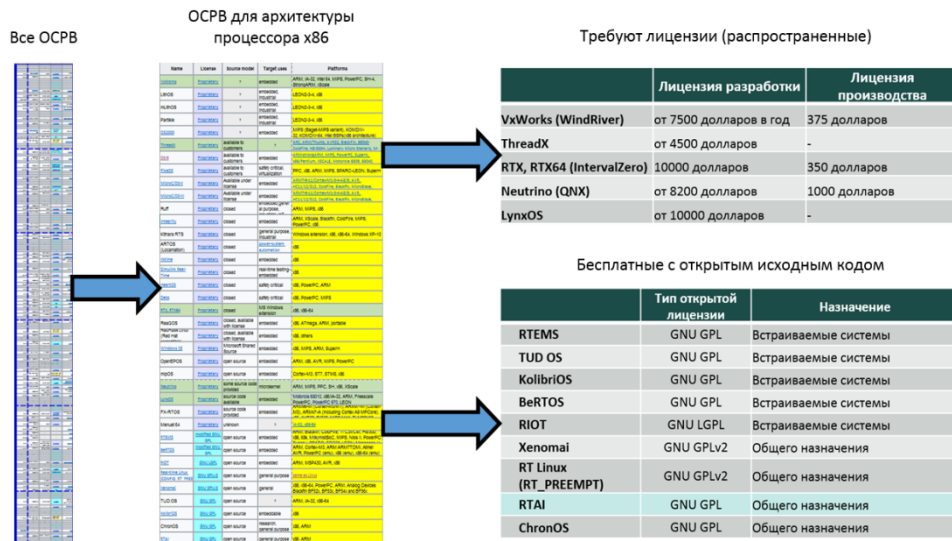


Рис. 1. Выбор OSCPV из списка существующих

Задачи реального времени в программной структуре контроллера движения. На базе системы реального времени был реализован программный контроллер движения, обеспечивающий следующий функционал:

- интерпретация траектории движения из блочных команд (G-кода);
- прогнозирование достижимости траектории с учетом предельных скоростей и ускорений (LookAhead);
- генерация профиля скоростей и ускорений по траектории;
- разложение траектории движения на оси (интерполяция) и синхронизация движения по осям;
- регулирование по положению: компенсация динамической ошибки управления, подающегося на исполнительные приводы.

Сервисные функции:

- ручное управление движением;
- управление периферией (дискретные входы-выходы, аналоговые входы-выходы);
- генерация отчетов о точности движения;
- прогнозирование и визуализация процесса движения.

Блок-схема контроллера движения, в центральной части выделены блоки, выполняющиеся в реальном времени, показана на рис. 2.

Блоки контроля периферии и положения осей выполняются в параллельных потоках и имеют наивысший приоритет, так как работают синхронно по жесткому циклу с периодом 1 мс. Эти блоки отправляют сигнал управления на серводрайверы и получают обратную связь по положению с использованием интерфейса связи Ethernet по протоколу UDP.

Структура контроллера движения, наиболее полно использующего возможности систем реального времени, описана в [5].



Рис. 2. Блок-схема контроллера движения на базе ОСРВ

Блок синхронизации вызывает выполнение функций регулирования положения по осям и функции управления периферией синхронно с перемещением.

Блок *LookAhead* делает прогноз о достижимости траектории движения на заданное число сервоциклов исходя из предельных скоростей и ускорений и корректирует планируемую общую скорость перемещения.

Блок генерации профилей скоростей и ускорений рассчитывает участки разгона/торможения по каждой из осей.

Блок *Overlap* реализует непрерывный переход от предыдущего профиля скорости к текущему (без снижения скорости до нулевого значения) для уменьшения времени переходов и поворотов по траектории движения.

Блок интерполяции рассчитывает задание по положению для цикла слежения по каждой из осей. Между блоками (модулями) предусмотрены буферы обмена данными, что позволяет эффективно использовать вычислительный ресурс системы и синхронизировать выполнение задач.

Слева на рис. 2 показаны модули, выполняющиеся не в реальном времени с низким приоритетом: блок интерпретатора декодирует программу в кодах ISO (G-кодах) и передает данные о кадрах программы через буфер движения модулям реального времени.

Результаты работы контроллера движения на базе ОСРВ. Для проверки динамической точности позиционирования были проведены два тестовых эксперимента, показывающих зависимость точности перемещения от предельной скорости движения по осям. Графики суммарной динамической ошибки перемещения в первом и втором эксперименте показаны на рис. 3 и 4 соответственно. Параметры и результаты эксперимента показаны в табл. 2.

В экспериментах менялась предельная скорость перемещения по каждой из осей, ускорение оставалось неизменным. В результате при увеличении скорости в 4 раза максимальная динамическая ошибка (отклонение от траектории движения) увеличилась на 33,3 % и составила 120 и 160 мкм соответственно.

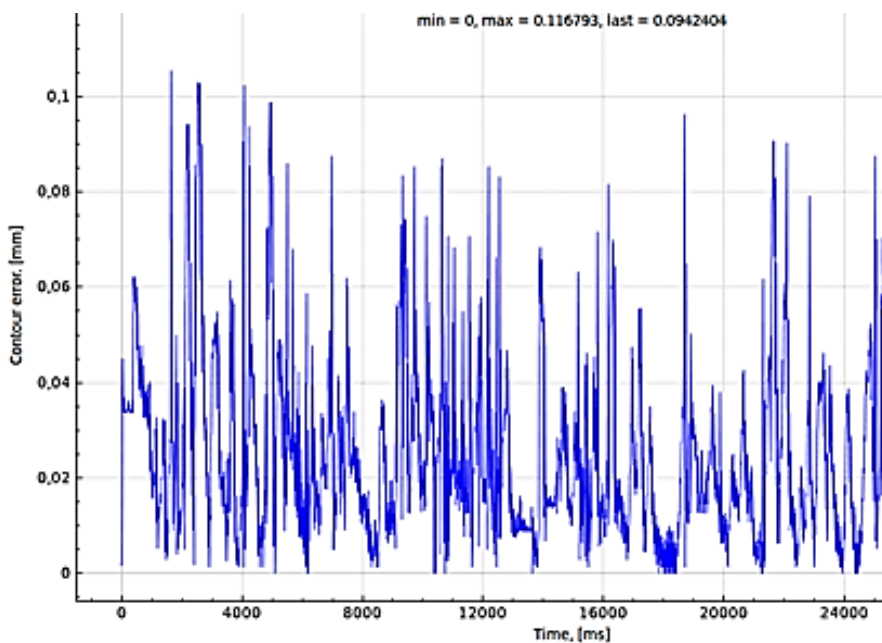


Рис. 3. График суммарной динамической точности перемещения по двум осям (эксперимент № 1)

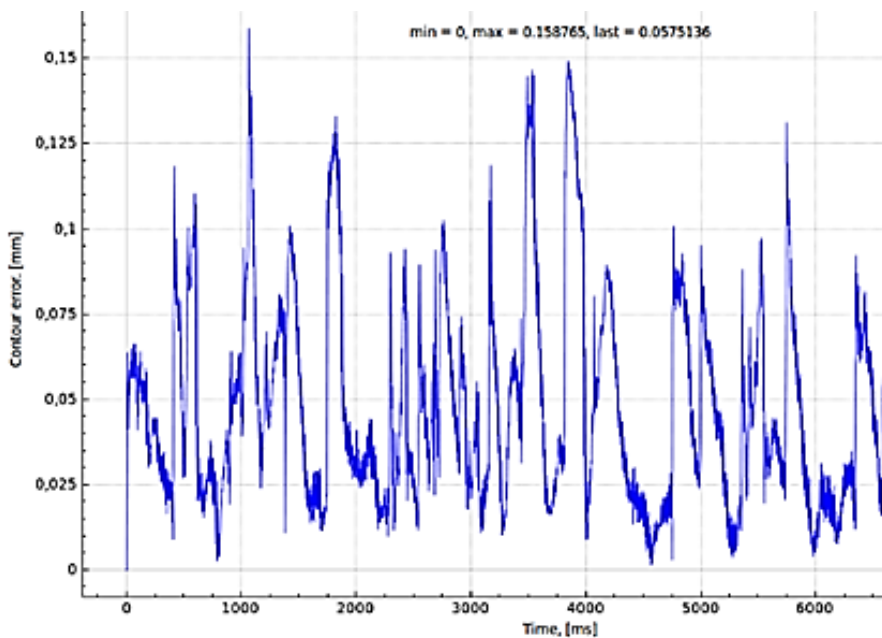


Рис. 4. График суммарной динамической точности перемещения по двум осям (эксперимент № 2)

Таблица 2

№ п/п	Параметры эксперимента		Результат эксперимента
	Предельное ускорение, мм/с ²	Предельная скорость, мм/мин	Суммарная динамическая ошибка, мкм
1	1000	120	Менее 120
2	1000	480	Менее 160

Заключение. Рассмотрены подходы к разработке контроллеров движения и выделены принципы их построения на базе ОСРВ с учетом особенностей высокоскоростных интерфейсов связи с исполнительными устройствами (серводрайверами).

Полученные экспериментальные данные подтверждают целесообразность использования ОСРВ в структуре контроллеров движения: точности и скорости перемещения в большей степени зависят от используемых принципов регулирования и в меньшей — от возможностей программно-аппаратного комплекса.

Большой вычислительный ресурс ОСРВ дает возможность введения сложных алгоритмов управления на базе методов искусственного интеллекта (нейронные сети, нечеткая логика). Структура разработанного контроллера позволяет внедрять дополнительные блоки управления без уменьшения быстродействия системы и без уменьшения ее динамических характеристик.

На базе разработанной системы планируется разработка алгоритмов адаптивного регулирования и коррекции положения приводов, а также алгоритмов компенсации вибраций, связанных с износом механической передачи осей установки.

Литература

- [1] Dubey R. *Introduction to Embedded System Design Using Field Programmable Gate Arrays*. London: Springer-Verlag, London Ltd, 2009.
- [2] Shao X., Sun D., Mills J.K. A New Motion Control Hardware Architecture with FPGA-Based IC Design for Robotic Manipulators. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Orlando, Florida, 2006.
- [3] Золотарев С. Операционные системы реального времени для 32-разрядных микропроцессоров. *Современная электроника*, 2006, №7, с. 1–4.
- [4] Spurgeon Ch.E., Zimmerman J. *Ethernet: The Definitive Guide*. 2nd edition. Sebastopol, CA, O'Reilly Media, 2014.
- [5] Suk-Hwan S., Seong-Kyoon K., Dae-Hyuk Ch., Stroud Ian. *Theory and Design of CNC Systems*. London, Springer-Verlag London Ltd, 2008.

Сведения об авторе:

Лобач Артем Юрьевич — аспирант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий инженер-разработчик, ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»

УДК 004.942

Моделирование системы управления исполнительным мехатронным модулем манипулятора

© | Мокаева Алиса Алексеевна

ahm.alisa@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены различные подходы к моделированию шестистепенного манипулятора в среде MATLAB & Simulink: использование пакета Robotics Toolbox, моделирование в Simscape Multibody и интеграция в нее твердотельной модели SolidWorks. Решены прямая и обратная задача кинематики средствами Simulink.

Ключевые слова: MATLAB, Simulink, моделирование, двигатель постоянного тока, манипулятор, кинематика, динамика

При анализе кинематических цепей следует учитывать динамику приводов, расположенных в сочленениях. В данной работе проводится моделирование исполнительного двигателя и подбор корректирующего устройства для дальнейшей реализации системы автоматического управления.

На рис. 1 изображена кинематическая схема шести степенного манипуляционного робота (МР) в соответствии с параметрами Денавита — Харгенберга (табл. 1).

В результате энергетического расчета приводов манипулятора были подобраны исполнительные двигатели приводов сочленений манипулятора [1, 2]. Исходя из требований к взаимозаменяемости принято решение использовать идентичные исполнительные мехатронные исполнительные модули во всех сочленениях.

Расчет будем вести для самого нагруженного второго привода.

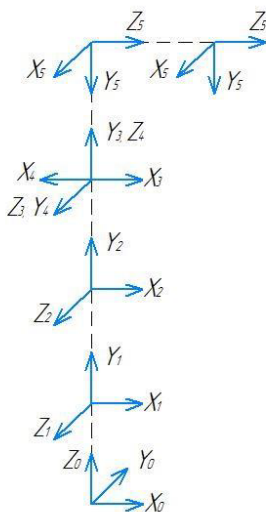


Рис. 1. Кинематическая схема

Параметры Денавита — Хартенберга

Номер звена	θ , рад	d , м	a , м	α , рад	σ
1	0	0,24	0	$-\pi/2$	0
2	0	3	0	0	0
3	0	3	0	0	0
4	π	0	0	$\pi/2$	0
5	$\pi/2$	0,24	0	$-\pi/2$	0
6	0	0,24	0	0	0

Числовые параметры двигателя ЗДБМ 120-1-0.4-3:

$$R_{я} = 0,63 \text{ Ом}; K_M = 0,34 \text{ Н} \cdot \text{м/А}; K_{\Omega} = 0,42 \text{ В} \cdot \text{с/рад}; J_{я} = 0,001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Как известно, тензор инерции звена зависит от расположения пространственной конфигурации МР [3]. На рис. 2 можно наблюдать изменение момента инерции звена 3 в зависимости от изменения углов в сочленении звеньев 2 и 3.

Примем наибольшее значение момента инерции

$$J_H = 3,207 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

возникающее при значениях углов в сочленениях $q_3 = -1,4$ рад и $q_4 = 1,7$ рад.

Схема замещения исполнительного двигателя постоянного тока (ДПТ) будет выглядеть, как показано на рис. 3 [4].

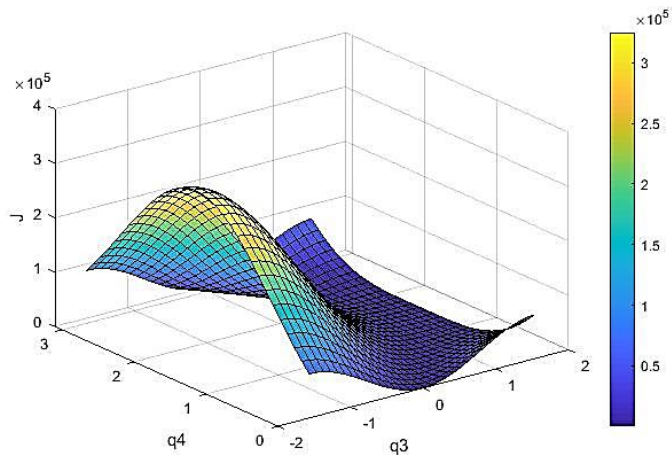


Рис. 2. Изменение момента инерции звена

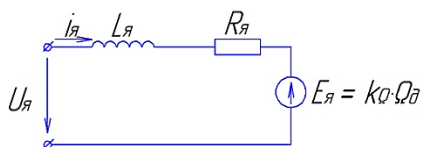


Рис. 3. Схема замещения ДПТ

Запишем уравнения электрического равновесия согласно схеме замещения:

$$U_{\text{я}} = L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + e_{\text{я}}. \quad (1)$$

К валу двигателя прикреплена нагрузка, поэтому уравнение динамического равновесия будет выглядеть так:

$$M_{\text{эм}} = J' \frac{d\Omega}{dt} + M_{\text{возм}}.$$

Момент возмущения примем равным нулю, поэтому уравнение примет вид

$$M_{\text{эм}} = J' \frac{d\Omega}{dt}; \quad (2)$$

$$M_{\text{эм}} = k_{\text{м}} i_{\text{я}}. \quad (3)$$

Уравнение связи:

$$e_{\text{я}} = k_{\Omega} \Omega, \quad (4)$$

тогда

$$J' = \frac{J_{\text{н}}}{i^2} + J_{\text{я}} + J_{\text{ред}} = \frac{3,207 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2}{498^2} + 0,001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 + 0,072 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 1,37 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $U_{\text{я}}$ — напряжение якоря; J' — приведенный момент инерции; $L_{\text{я}}$ — индуктивность якоря; $i_{\text{я}}$ — ток якоря; $R_{\text{я}}$ — активное сопротивление якоря; $e_{\text{я}}$ — противо-ЭДС; $J_{\text{я}}$ — момент инерции якоря; $J_{\text{н}}$ — момент инерции, приведенный к валу двигателя (нагрузочный); $J_{\text{ред}}$ — момент инерции редуктора; $M_{\text{эм}}$ — электромагнитный момент; Ω — угловая скорость поворота вала двигателя; $k_{\text{м}}$, k_{Ω} — коэффициенты.

Выведем уравнение с разделенными переменными:

$$\frac{d}{dt} = p,$$

где p — оператор дифференцирования

Приравняем (2) и (3), отсюда выразим $i_{\text{я}}$. Подставив в (1), с учетом (4) получим:

$$\begin{aligned} k_{\text{м}} i_{\text{я}} &= J' p \Omega; \\ i_{\text{я}} &= \frac{p \Omega J'}{k_{\text{м}}}; \\ U_{\text{я}} &= L_{\text{я}} \frac{p^2 \Omega J'}{k_{\text{м}}} + R_{\text{я}} \frac{p \Omega J'}{k_{\text{м}}} + k_{\Omega} \Omega; \\ \frac{U_{\text{я}}}{k_{\Omega}} &= L_{\text{я}} \frac{p^2 \Omega J'}{k_{\text{м}} k_{\Omega}} + R_{\text{я}} \frac{p \Omega J'}{k_{\text{м}} k_{\Omega}} + \Omega. \end{aligned} \quad (5)$$

Введем замену: $T_3 = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ — электромагнитная постоянная цепи якоря (из-за наличия $L_{\text{я}}$), $L_{\text{я}} = 0,03$ Гн; $T_{\text{эм}} = \frac{J'R_{\text{я}}}{k_{\text{м}}k_{\Omega}}$ — постоянная времени нарастания скорости ИД (электро-механическая постоянная времени).

Тогда уравнение (5) примет вид

$$\frac{U_{\text{я}}}{k_{\Omega}} = T_{\text{эм}}T_3p^2\Omega + T_3p\Omega + \Omega,$$

где $\Omega = p\alpha$ (α — угол поворота вала двигателя),

$$\frac{U_{\text{я}}}{k_{\Omega}} = (T_{\text{эм}}T_3p^2 + T_3p + 1)p\alpha. \quad (6)$$

Получим передаточную функцию неизменяемой части:

$$W_{\text{н.ч}} = W_{\text{ум}}W_{\text{ИДнОУ}}W_{\text{ред}};$$

$$W_{\text{ИДнОУ}} = \frac{\alpha}{U_{\text{я}}} = \frac{1}{k_{\Omega}(T_{\text{эм}}T_3p^2 + T_3p + 1)p} = \frac{k_{\text{н.ч}}}{(T_{\text{эм}}T_3p^2 + T_3p + 1)p}; \quad (7)$$

$$W_{\text{ум}} = 1; \quad W_{\text{ред}} = \frac{1}{i_{\text{ред}}},$$

где $k_{\text{н.ч}} = \frac{1}{k_{\Omega}} = \frac{1}{0,42} = 2,38$ — коэффициент усиления неизменяемой части.

Выполним вычисления:

$$T_3 = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,03 \text{ Гн}}{25 \text{ Ом}} = 0,0012 \text{ с};$$

$$T_{\text{эм}} = \frac{J'R_{\text{я}}}{k_{\text{м}}k_{\Omega}} = \frac{1,37 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 0,63 \text{ Ом}}{0,42 \text{ Н} \cdot \text{м/А} \cdot 0,55 \text{ В} \cdot \text{с/рад}} = 0,012 \text{ с}.$$

Пусть $T_1 = T_{\text{эм}} = 0,012$ с,

$$T_2 = \sqrt{T_3T_{\text{эм}}} = \sqrt{0,0012 \text{ с} \cdot 0,012 \text{ с}} = 0,004 \text{ с}.$$

Так как $T_1 > 2T_2$ ($0,012 \text{ с} > 2 \cdot 0,004 \text{ с}$), звено апериодическое, тогда

$$W_{\text{ИДнОУ}} = \frac{k_{\text{н.ч}}}{p(T_2^2p^2 + T_1p + 1)} = \frac{k_{\text{н.ч}}}{p(T_3p + 1)(T_4p + 1)},$$

где

$$T_{3,4} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} - T_2^2}, \quad T_3 = 0,01 \text{ с}, \quad T_4 = 0,0015 \text{ с}.$$

Итоговая передаточная функция неизменяемой части

$$W_{\text{нч}} = W_{\text{ум}} W_{\text{ИДиОУ}} W_{\text{ред}} =$$

$$= 1 \frac{2,38}{p(0,01p + 1)(0,0015p + 1)} \frac{1}{498} = \frac{0,005}{p(0,001p + 1)(0,0015p + 1)}$$

Неизменяемую часть можно представить в виде структуры, изображенной на рис. 4. Для проверки значений перерегулирования, времени переходного процесса и запасов устойчивости по фазе/амплитуде воспользуемся программой MATLAB [5] (рис. 5–7).

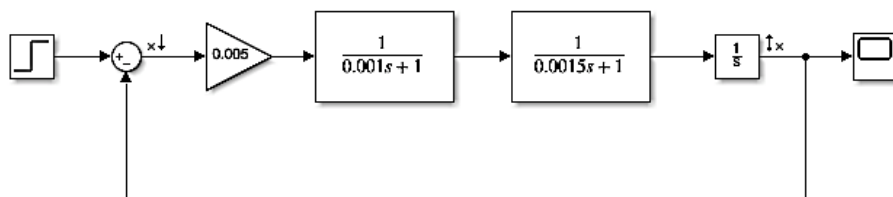


Рис. 4. Неизменяемая часть

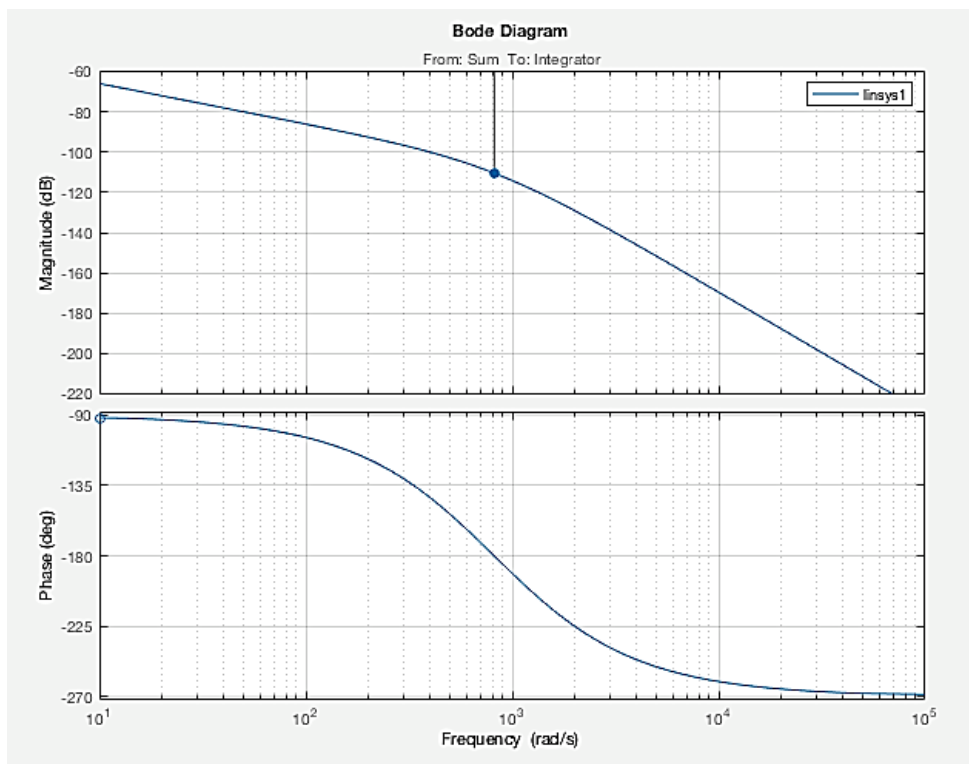


Рис. 5. ЛАЧХ неизменяемой части

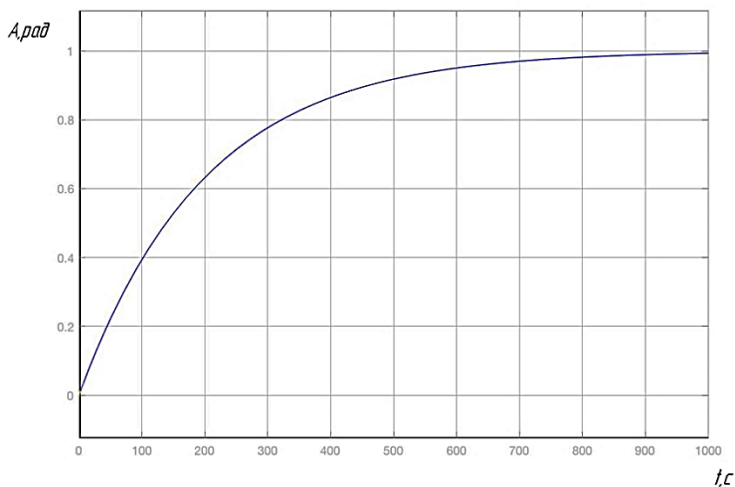


Рис. 6. Реакция на ступенчатое воздействие

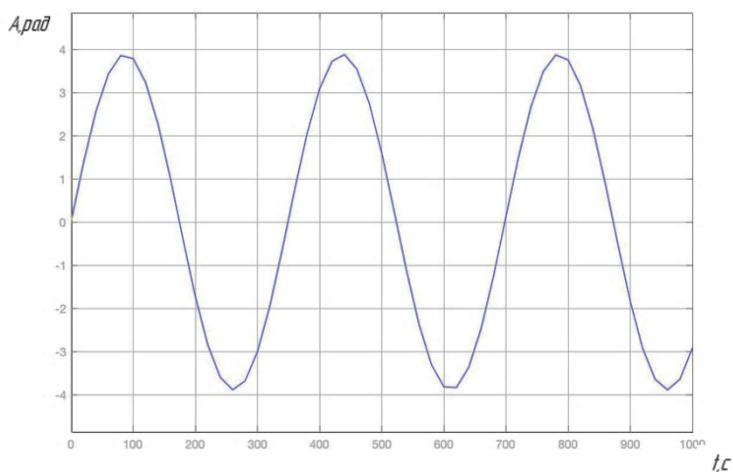


Рис. 7. Ошибка при отработке гармонического сигнала

Таким образом, можно установить, что значение времени явно превышает допустимое. В схему необходимо вводить корректирующие устройства.

Для задания нужных требований к качеству динамических процессов в систему вводят ПИД-регулятор:

$$K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S.$$

Тогда с учетом коррекции система принимает вид, показанный на рис. 8.

Определяем рабочую частоту:

$$\dot{\alpha}_{\max} = 0,07 \text{ рад/с}; \quad \ddot{\alpha}_{\max} = 0,0013 \text{ рад/с}^2; \quad \delta_{\text{уст}} = 0,8^\circ = 0,015 \text{ рад.}$$

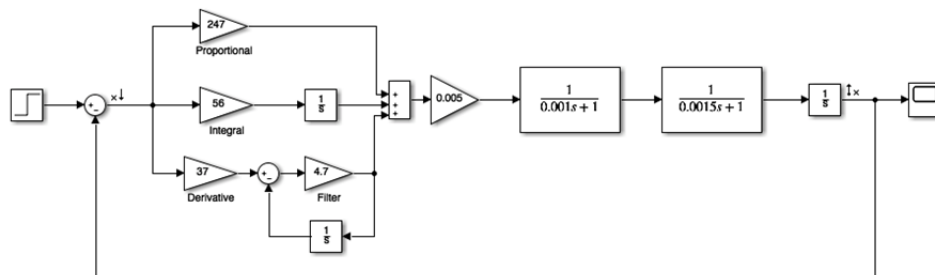


Рис. 8. Скорректированная система

Исходя из требований к системе по точности, определим значения «рабочих» частоты ω_p и амплитуды a_p :

$$\omega_p = \frac{\ddot{\alpha}_{\max}}{\dot{\alpha}_{\max}} = \frac{0,0013 \text{ рад/с}^2}{0,07 \text{ рад/с}} = 0,018 \text{ с}^{-1}; \quad a_p = \frac{\dot{\alpha}_{\max}}{\omega_p} = \frac{0,07 \text{ рад/с}}{0,018 \text{ с}^{-1}} = 3,89 \text{ рад.}$$

Настраивая коэффициенты K_d , K_p , K_i , добиваемся необходимых показателей качества. Для настройки коэффициентов воспользуемся пакетом Simulink Design Optimization (рнис. 9–11). После оптимизации получим:

$$K_d = 37; K_p = 247; K_i = 56.$$

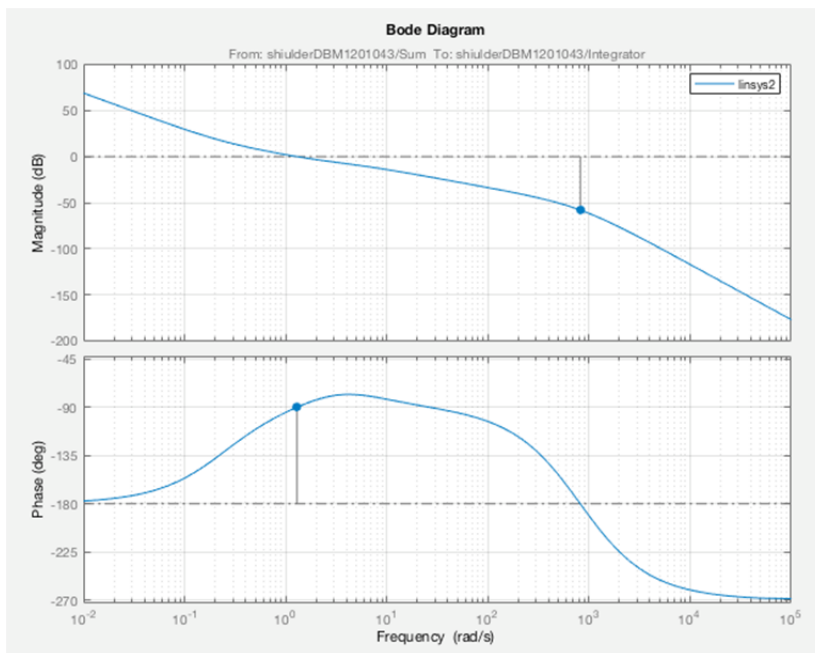


Рис. 9. ЛАЧХ скорректированной системы

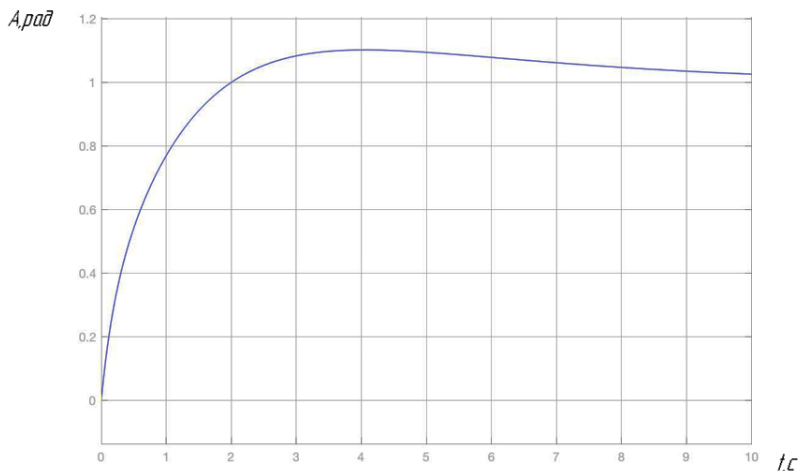


Рис. 10. Реакция на единичное воздействие

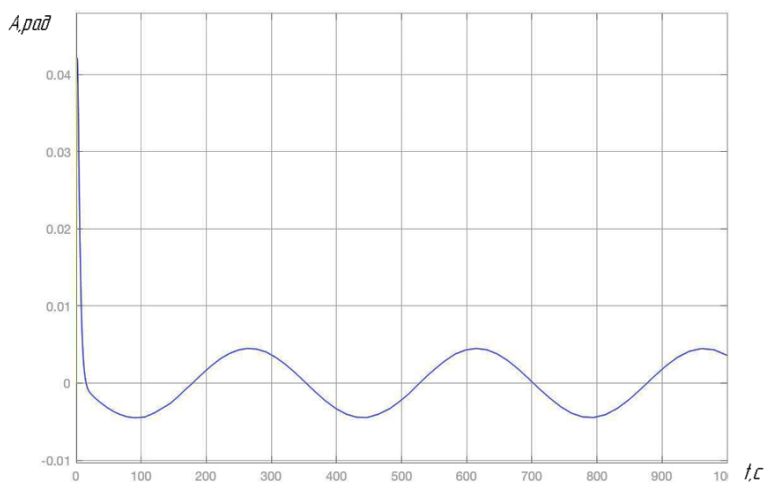


Рис. 11. Ошибка при отработке гармонического сигнала

В результате была разработана математическая модель исполнительного двигателя, проведен анализ быстродействия и точности, в результате которого в систему было введено корректирующее устройство.

Литература

- [1] Шахинпур М. *Курс робототехники* / пер. с англ. Москва, Мир, 1990.
- [2] Лесков А.Г., Ющенко А.С. *Моделирование и анализ робототехнических систем*. Москва, Машиностроение, 1992.

- [3] Юревич Е.И. *Основы робототехники*. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2005.
- [4] Копылов И.П. *Электрические машины: учеб. пособие для вузов*. Москва, Энергоатомиздат, 1986, 360 с.
- [5] MATLAB.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://matlab.ru/> (дата обращения 29.02.2018).

Сведения об авторе:

Мокаева Алиса Алексеевна — магистрант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 004.942

Подходы к созданию модели манипулятора в Simulink

© | Мокаева Алиса Алексеевна

ahm.alisa@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены вопросы исследования динамики последовательных кинематических цепей. Немаловажным фактором при моделировании манипуляторов является учет взаимовлияния приводов в сочленениях. В работе проведен энергетический расчет приводов манипулятора, построена математическая модель самого нагруженного из них, для которого проведен синтез системы автоматического управления.

Ключевые слова: *привод, динамика, манипулятор, энергетический расчет, система автоматического управления*

Моделирование сложных динамических систем удобнее всего проводить в специализированных программных приложениях. Так, для разработки модели системы манипуляторов для захвата космического мусора для миссии [1] был выбран пакет MATLAB&Simulink.

1. Моделирование кинематической цепи

1.2. Модель манипулятора в Robotics Toolbox

Robotics Toolbox является свободно распространяющимся пакетом надстройки для MATLAB и предназначен для моделирования робототехнических систем различного назначения [2, 3]. В частности, Robotics Toolbox способен создавать модели разомкнутых кинематических цепей посредством задания пространства параметров Денавита — Хартенберга.

В функционал Robotics Toolbox входит решение прямой и обратной задачи кинематики, прямой и обратной задачи динамики, определение приведенных к СК_i тензоров инерции, матриц инерции, матриц однородного преобразования и прочее.

Объект класса Link описывает звено манипулятора и учитывает не только его геометрические параметры, но динамические параметры, обусловленные двигателем и редуктором в приводе звена (рис. 1).

Группируя объекты класса Link в объект SerialLink, на выходе получаем разомкнутую кинематическую цепь (рис. 2, 3).

```
%SerialLink
L(1)=Link([0 0 1 0]);
L(1).I = [Ixx Iyy Izz]; %inertia matrix
L(1).r = [0.15 0.15 1.5] %link centre of gravity
L(1).m=m; %link mass
L(1).G=3; %gear ratio
L(1).B=0.4; %joint friction
L(1).Jm=0.003; %motor inertia
```

Рис. 1. Описание объекта типа Link

```
two_link =
two link:: 2 axis, RR, stdDH, slowRNE
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |   theta |     d |     a |   alpha |   offset |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |    q1 |     0 |     3 |     0 |     0 |
| 2 |    q2 |     0 |     3 |     0 |     0 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

Рис. 2. Представление двухзвенного манипулятора в пространстве Денавита — Хартенберга

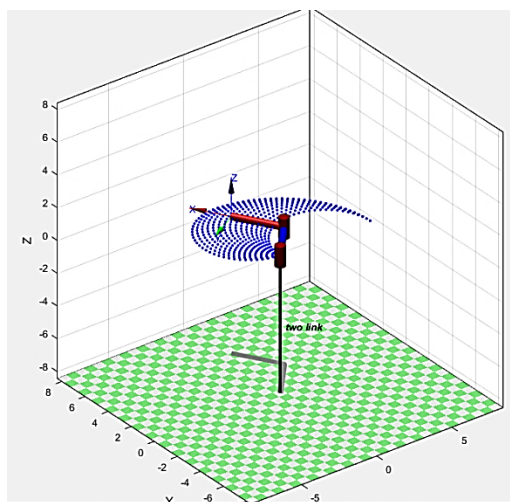


Рис. 3. Модель манипулятора в Robotics Toolbox

Характерным для Robotics Toolbox является задание конкретных конфигураций манипулятора, для которых будут проводиться дальнейшие расчеты (рис. 4).

```
%Positions
qn=[1 1];
qf=[-pi/2 pi];
qz=[0 0];
two_link.plot(qn);
```

Рис. 4. Характерные конфигурации манипулятора:
 $q(k)$ — вектор-строка, в которой отражены повороты i -го звена согласно номеру элемента последовательности, относительно СК_{*i*}, значения задаются в радианах (qn — рабочее положение манипулятора, qf — сложенное положение, qz — полностью вытянутое положение)

Результаты работы команды plot для каждой из описанных конфигураций представлены на рис. 5.

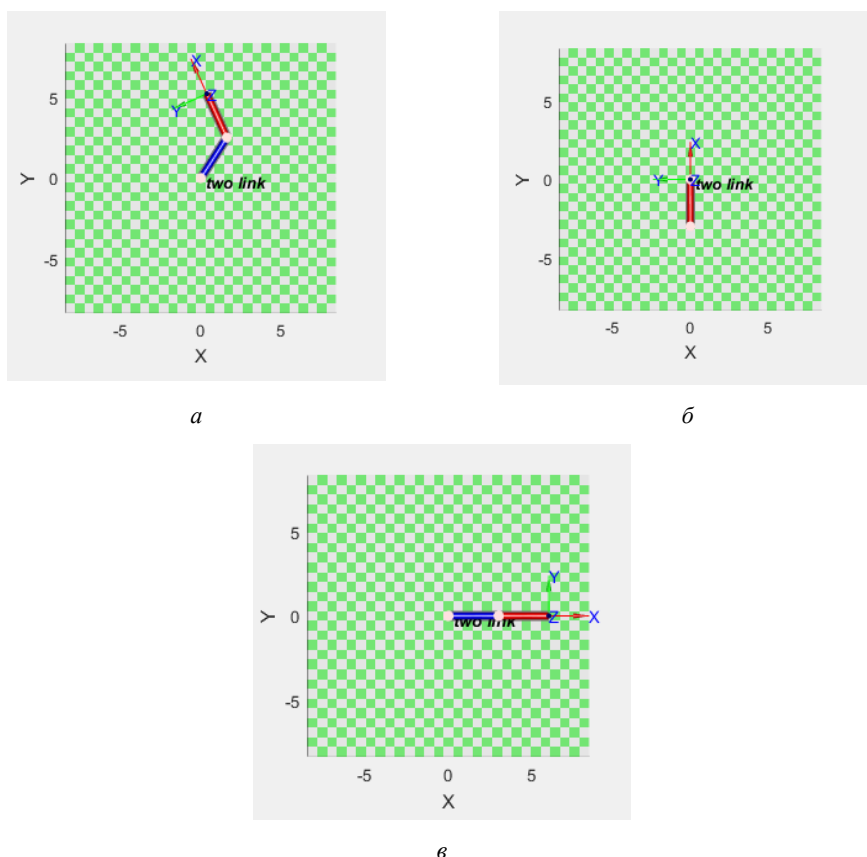


Рис. 5. Положение манипулятора в соответствующих конфигурациях:
a — конфигурация *qn*; *б* — конфигурация *qf*; *в* — конфигурация *qz*

К недостаткам моделирования в Robotics Toolbox можно отнести дискретность проводимых расчетов для фиксированных положений, поэтому было предложено разработать модель в Simulink Simscape Multibody для обеспечения возможности наблюдать изменение параметров в динамике.

1.2. Модель манипулятора в Simulink Simscape Multibody. Simscape предоставляет окружение для моделирования и симуляции физических систем, содержащих компоненты из различных инженерных сфер деятельности: механических, электрических, гидравлических и др. С помощью инструмента можно моделировать многотельные системы с использованием блоков, которые являются представлением тел, соединений, ограничительных связей и элементов силы.

В общем случае звено с вращательным шарниром может быть представлено в Simscape как последовательность блоков, показанная на рис. 6.

Блоки World Frame, Mechanism Configuration и Solver Configuration несут в себе настройку окружения: параметры решателя, поля силы тяжести и пр. Блок Prismatic Joint представляет собой кинематическую пару V порядка и зависит от параметров B (base) и F (follower), которые определяют вращение твердотельных элементов Frame и Link друг относительно друга. В данном случае блок Frame жестко связан с окру-

жением, блок Link может свободно вращаться. По умолчанию движение происходит относительно центра масс звена, вращение вокруг оси Z (отмечена синим цветом, X — красным, Y — зеленым), как показано на рис. 7.

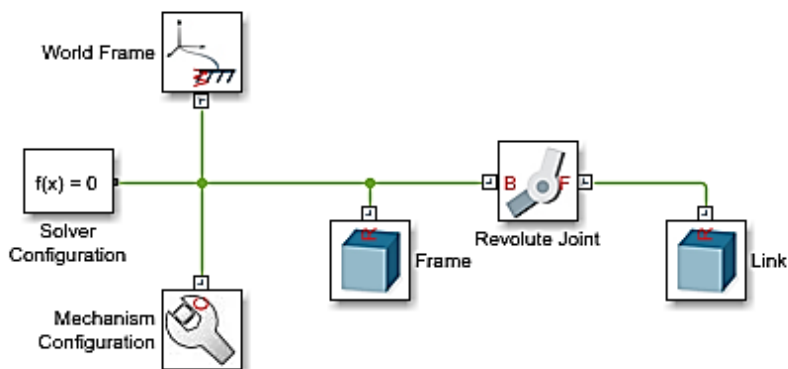


Рис. 6. Типовое представление звена

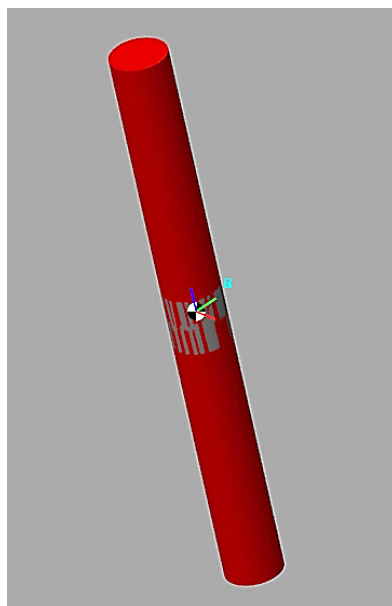


Рис. 7. Симуляция блоков Frame (серый) и Link (красный)

Вращение и сдвиг систем координат относительно начального положения осуществляется путем использования блока Rigid Transform, внешний вид и свойства которого представлены на рис. 8.

Путем последовательного вращения, сдвига систем координат и комбинации типовых звеньев на выходе получаем двухзвенный манипулятор с устройством захвата (рис. 9).

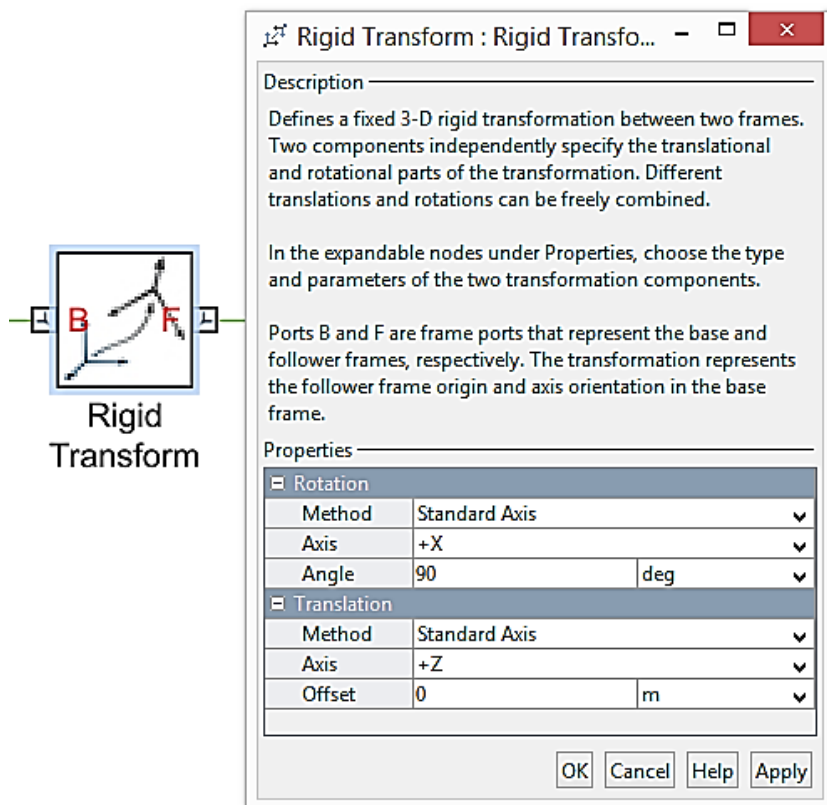


Рис. 8. Свойства блока Rigid Transform

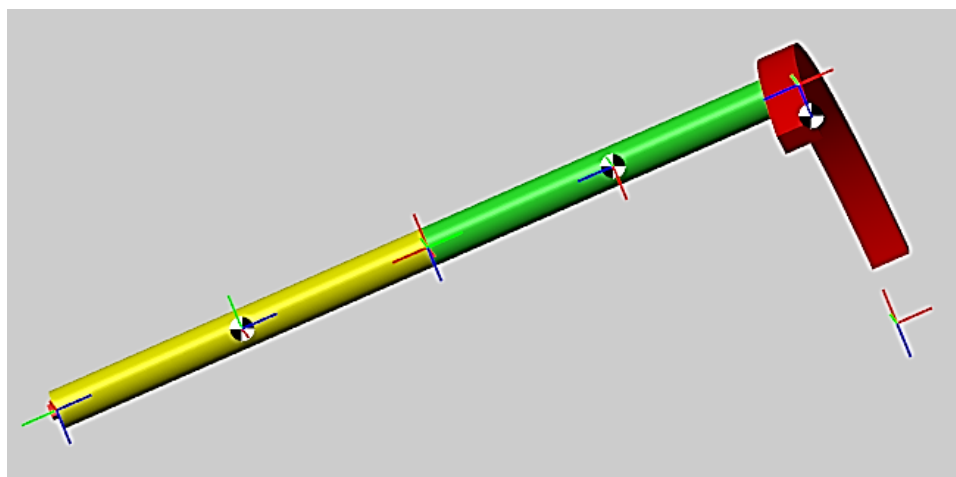


Рис. 9. Общий вид модели манипулятора в Simscape

1.3. Дополнение модели подсистемами исполнительных механизмов. На основании проведенного ранее энергетического расчета был выбран двигатель 3ДБМ185-16-0,15-3 мощностью 90 Вт, основные параметры которого представлены ниже.

Параметры двигателя

Условное обозначение двигателя	3 ДБМ 185-16-0,15-3
Наружный диаметр статора D , мм	185
Внутренний диаметр ротора d , мм	66
Осевая длина, L , мм, не более	99
Число пар полюсов	8
Число фаз	3
Номинальное напряжение питания, В	27
Частота вращения при идеальном холостом ходе, об/мин.....	125–155
Пусковой момент, Н·м, не менее.....	40,0
Спротивление секции фазы (фазы) постоянному току при температуре 20 °С, Ом	0,60–0,72
Электромагнитная постоянная времени фазы, мс, не более	1,40
Приведенные к фазе коэффициенты: момента C_m , Н·м/А; ЭДС C_E , В·с/рад	1,000–1,240
Момент инерции ротора, кг·м ²	$15 \cdot 10^{-3}$
Момент сопротивления при обесточенных обмотках, Н·м, не более	1,600
Предельно допустимая амплитуда тока в фазе обмотки статора, А	60,0
Термическое сопротивление статора, °С/Вт	0,05–0,10
Масса, кг, не более	9,30
Электромеханическая постоянная времени (усредненная), мс	7,2

Заявленный двигатель подходит по мощности, но не удовлетворяет требованиям по номинальному моменту. Для решения этой задачи требуется дополнить систему редуктором, тем самым повысив значение крутящего момента.

$$i_0 = \frac{M_{\text{вых}}}{M_{\text{ном}}},$$

где $M_{\text{вых}} = 67,38 \text{ Н} \cdot \text{м}$ — требуемый момент в сочленении,

$$i_0 = \frac{67,38}{0,533} = 126,4.$$

Таким образом, передаточное отношение редуктора должно быть не менее $i = 127$. Этому требованию удовлетворяет редуктор фирмы Maxon Motor GP32C 223098, совместимый с выбранным ранее двигателем.

Параметры редуктора приведены ниже.

Параметры редуктора

Передаточное отношение	156:1
Момент инерции, г·см ²	9,1
Максимальный диаметр выходного вала, мм	8

Для повышения точности динамической модели необходимо учитывать характеристики двигателя. Было принято решение ввести в модель манипулятора подсистему, описывающую поведение выбранного двигателя (рис. 10).

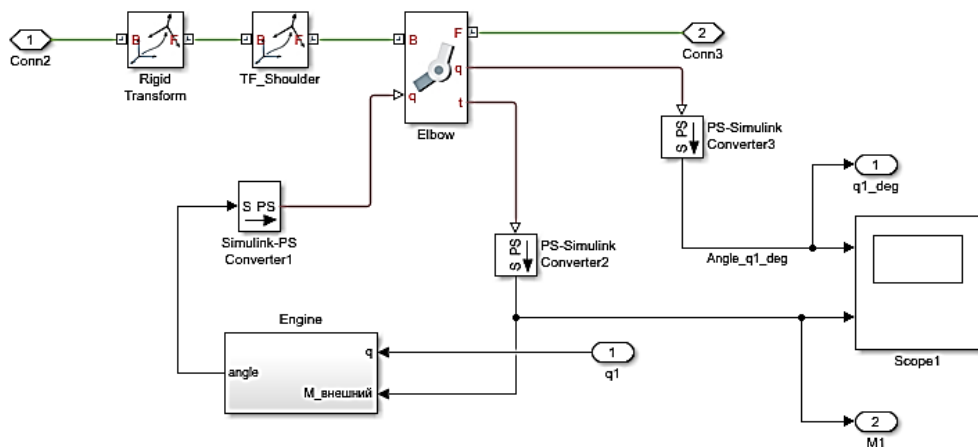


Рис. 10. Подсистема привода плечевого звена манипулятора

На основании параметров двигателя построена модель двигателя постоянного тока, представленная на рис. 11.

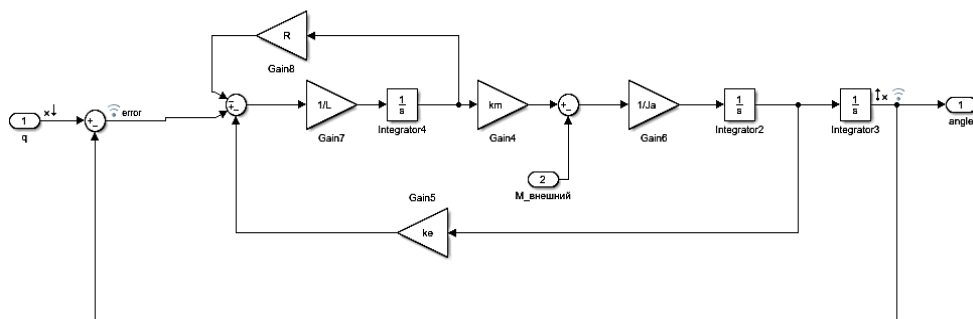


Рис. 11. Подсистема Engine:

L — индуктивность обмоток двигателя, Гн; R — сопротивление обмоток двигателя, Ом;
 J_a — момент инерции ротора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; k_m , k_e — приведенные к фазе коэффициенты:
 момента C_m , $\text{Н} \cdot \text{м/А}$ и ЭДС C_E , $\text{В} \cdot \text{с/рад}$ соответственно

1.4. Интеграция с SolidWorks. В общем случае конструкция звеньев более сложная и включает помимо собственно звена множество других элементов (фитинги, силовые модули приводов, электронные блоки, вычислительные системы, навесное оборудование — телекамеры, устройства систем наведения и т. д.). Поэтому задача расчета массогабаритных параметров звеньев решается на основе «суммирования» массогабаритных параметров отдельных их элементов. Разделение общей конструкции звеньев на отдельные элементы чаще всего происходит естественным образом (по функциональному признаку — привод, стрела и т. д.) и осуществляется на основе анализа конструкции МР.

Конструкция космического манипулятора может быть представлена состоящей элементов «стрела» и «привод» соответственно. К массогабаритным характеристикам элементов i -го звена относятся:

- масса элемента;
- координаты центра масс;
- тензор инерции элемента, заданный в системе координат (СК), связанной с центром масс элемента.

Для упрощения данной задачи, а также для уточнения входных данных на основе конструктивных решений, принятых при проектировании существующих космических манипуляторов, была разработана твердотельная модель манипулятора в среде SolidWorks, представленная на рис. 12.



Рис. 12. Модель манипулятора в SolidWorks

Модели, разработанные в SolidWorks, после интеграции с MATLAB могут быть экспортированы и описаны файлом формата .XML [4], как представлено на рис. 13 и 14 соответственно. При импорте файла в среду Simulink создается последовательность твердотельных элементов, соединенных кинематическими парами, с сохранением геометрии и свойств материалов, выбранных в SolidWorks при проектировании.

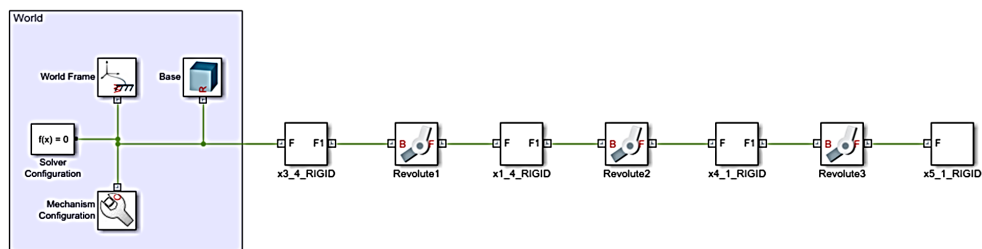


Рис. 13. Модель после экспорта в Simulink

Значения параметров Mass, CenterOfMass и Inertia потребуются в дальнейшем при решении обратной задачи динамики.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
- <SimscapeMultibodyImportXML xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xmlns="urn:mathworks:SimscapeMultibody:import" version="2.0">
  <Created from="SolidWorks 25.3.0" using="Simscape Multibody Link Version 5.0"
    on="12/09/17|14:55:32" by=""/>
  <ModelUnits length="millimeter" mass="kilogram"/>
  <DataUnits length="meter" mass="kilogram"/>
  + <RootAssembly version="382" uid="One" name="One">
  <Assemblies> </Assemblies>
  - <Parts>
    - <Part version="281"
      <ModelUnits length="millimeter" mass="kilogram"/>
      <PartFile name=
    - <MassProperties> [1x1]
      <Mass>
      <CenterOfMass> [3x1]
      </CenterOfMass>
      <Inertia>
        [3x3]
      </Inertia>
      </MassProperties>
      <GeometryFile name=
    + <VisualProperties>
  </Part>
  + <Part version="430"
  + <Part version="662"
  + <Part version="324"
  </Parts>
</SimscapeMultibodyImportXML>

```

Рис. 14. Структура модели после экспорта

2. Кинематика

2.1. Расчетная кинематическая схема манипулятора. Как было рассмотрено ранее, манипулятор состоит из двух звеньев, сочлененных двумя шарнирами вращательного типа V порядка. На рис. 15 приведена расчетная кинематическая схема для решения обратной кинематической задачи (ОКЗ) [5, 6].

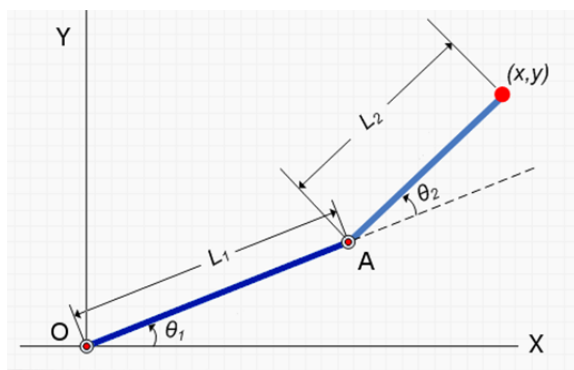


Рис. 15. Кинематическая схема

Шарниры (звенья) нумеруются от основания, которое также считается звеном МР и имеет порядковый номер 0 [2, 3]. С каждым из шарниров (звеньев) жестко свя-

зывается правая ортогональная система координат $СК_i$, как показано на рис. 16. Таким образом, звено i вращается относительно звена $i - 1$ вокруг оси Z_{i-1} (в i -м шарнире). В положении, показанном на рис. 16, все значения координат шарниров полагаются нулевыми.

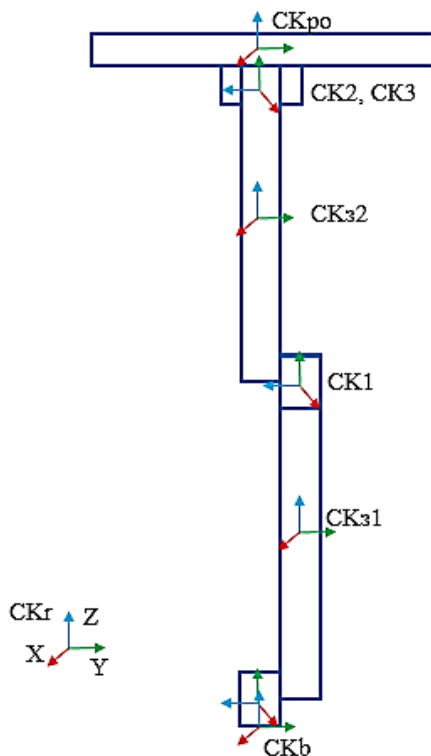


Рис. 16. Отображение систем координат

Помимо СК звеньев вводится СКб — базовая система координат, и реперная СКг, определяющая ориентацию манипулятора относительно продольной оси симметрии аппарата [2]. Для базовой СК введены шесть координат, определяющих линейные координаты ее начала относительно реперной СК и угловые координаты. Основание считается неподвижным. СКз2, СКз3 и СКро связаны с центрами масс звеньев и рабочего органа (РО) соответственно.

Каждое из звеньев имеет набор геометрических параметров, задаваемых в соответствующих СК, связанных со звеньями. Будем полагать длины звеньев равными 3000 мм, диаметр — 300 мм.

С учетом конфигураций, рассмотренных в п. 1.1, для данной конструкции манипулятора обратная задача кинематики может быть решена для любой точки, входящей в рабочее пространство, изображенное на рис. 17. Обобщенными координатами q_1 и q_2 в данном случае являются углы поворота звеньев θ_1 и θ_2 соответственно относительно СК0 и СК1 (см. рис. 15, 16).

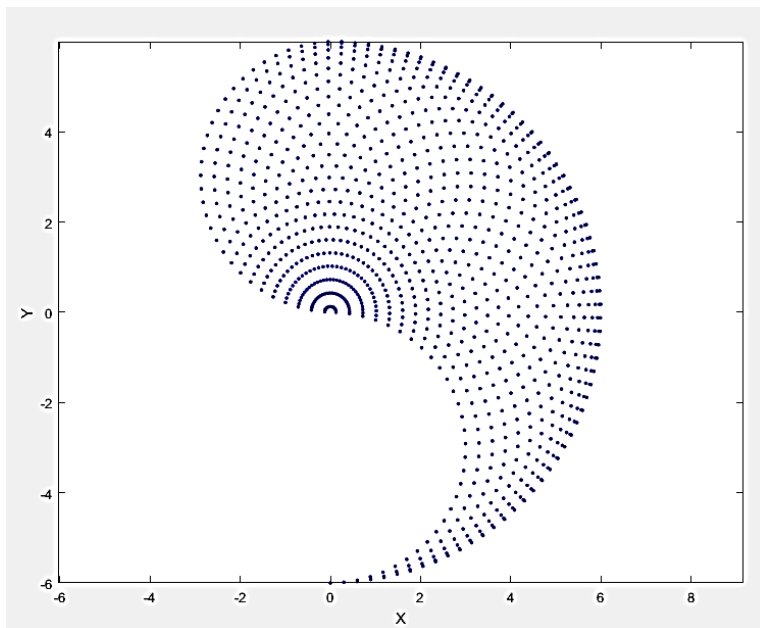


Рис. 17. Рабочее пространство манипулятора

2.2. Решение обратной задачи кинематики. Определение координат сочленений по заданным линейным координатам РО и углам его ориентации относительно базовой СК при известных параметрах звеньев исполнительного механизма носит название обратной кинематической задачи о положении ИМ или обратной позиционной кинематической задачи (ОКЗ).

Необходимость решения ОКЗ возникает в связи с тем, что законы движения РО манипулятора чаще всего задают в пространстве декартовых координат, а реальное движение ИМ обеспечивается работой приводов шарниров.

Для решения ОКЗ в модель манипулятора в Simscape была введена функция Two_link_invkin, входными параметрами для которой являются координаты точки в плоскости XOZ (плоскости работы манипулятора согласно рис. 17), выходными — значения углов поворота приводов шарниров (рис. 18).

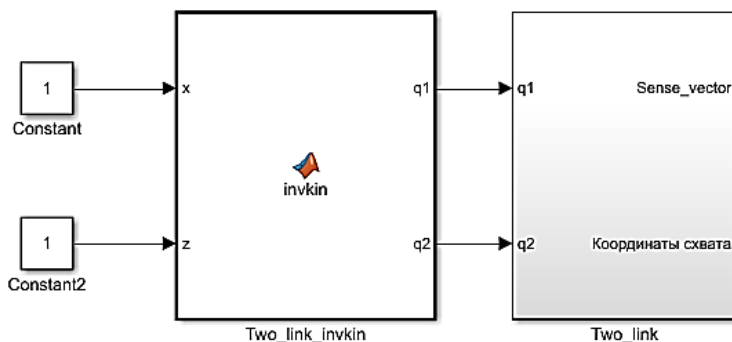


Рис. 18. Функция Two_link_invkin

Поскольку манипулятор двухзвенный и планарный, решение ОКЗ сводится к ряду простых геометрических преобразований. Описание функции решения ОКЗ приведено на рис. 19.

```
function [q1, q2] = invkin(x, z)
% параметры манипулятора
l1 = 3;
l2 = 3;
q2=acos((x^2+z^2-l1^2-l2^2)/(2*l1*l2));
q1=atan(x/z)-atan((l2*sin(q2))/(l1+l2*cos(q2)));
```

Рис. 19. Вычисление углов поворота приводов шарниров

2.3. Выделение матрицы однородных преобразований. Однородные преобразования систем координат можно считать прямым следствием из решения задач кинематики. Матрицы однородных преобразований позволяют одним действием описать и операции поворота и операции переноса [2, 5].

В модель была введена подсистема выделения матрицы однородных преобразований СК_{ро} в СК_б для дальнейшего использования при решении задач динамики (рис. 21, 22).

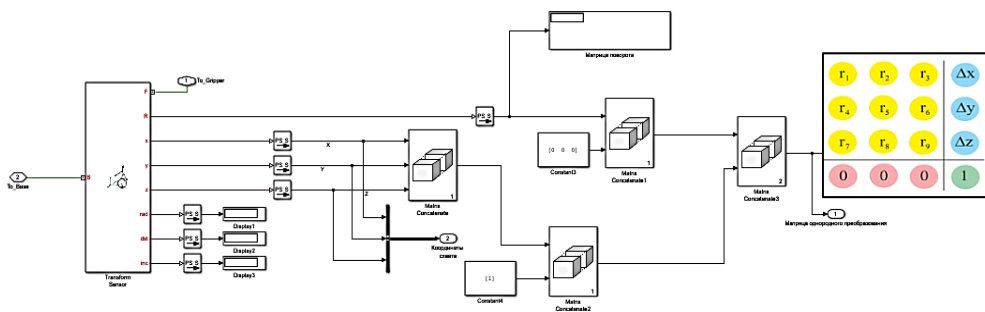


Рис. 20. Выделение матрицы однородных преобразований

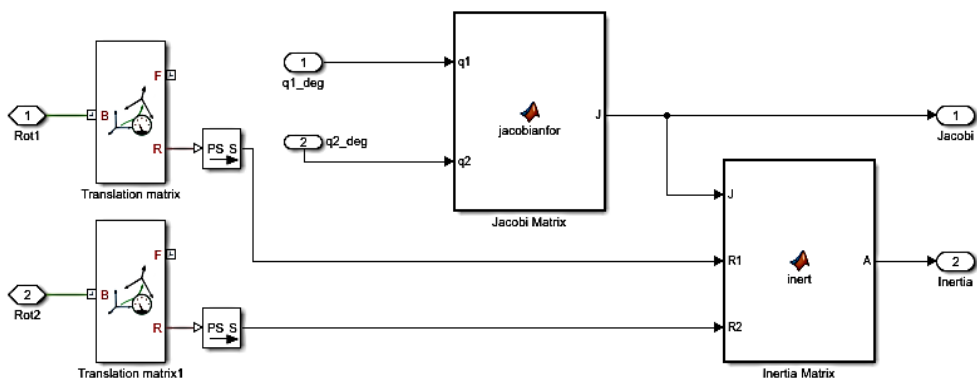


Рис. 21. Подсистемы Jacobi Matrix и Inertia Matrix

3. Динамика

Общий метод получения уравнений с помощью подхода Лагранжа — Эйлера основан на следующем уравнении [3, 7]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = -\tau_i,$$

где L — функция Лагранжа ($L = T - U$); T — полная кинетическая энергия манипулятора; U — полная потенциальная энергия манипулятора; τ_i — обобщенные силы и моменты; q_i — обобщенные координаты, т. е. θ_i ;

$$\tau_i = A(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}),$$

где $A(q)$ — матрица инерционных коэффициентов; $b(q, \dot{q})$ — вектор кориолисовых и центробежных сил [2]. Компонентой, связанной с действием поля силы тяжести пренебрегаем, так как система рассматривается в условиях микрогравитации.

Для рассматриваемого двухзвенного манипулятора уравнения Лагранжа — Эйлера имеют вид

$$(m_1 + m_2)l_1^2\ddot{\theta}_1 + m_2l_1l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)\ddot{\theta}_2 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) = 0;$$

$$m_2l_2^2\ddot{\theta}_1 + m_2l_1l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)\ddot{\theta}_1 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) = 0.$$

Чтобы выразить основные уравнения динамики относительно некоторой оси вращения, необходимо знать распределение масс робота относительно этой оси. Для описания таких распределений масс при вращении используется тензор инерции — матрица

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}.$$

Для данной системы будем использовать тензоры инерции, полученные при импорте модели SolidWorks, как показано на рис. 14.

Матрица инерционных коэффициентов определяет величины инерционных составляющих нагрузок приводов. Знание значений элементов этой матрицы необходимо при проведении энергетического и динамического расчета приводов. Диагональные элементы этой матрицы — моменты инерции звеньев как нагрузки отдельно взятых приводов. Недиагональные элементы — моменты инерции нагрузки приводов по каналам перекрестных связей. Элемент матрицы $A(q)$ вычисляется в виде

$$a_{ij} = \sum_{k=\max(i,j)}^n c_i^{(0)T} I_k^{(0)} c_j^{(0)} + D_{ki}^{(0)T} m_k D_{kj}^{(0)}$$

где $c_i^{(0)}$, $D_{ki}^{(0)}$ — элементы матрицы Якоби, связанные с вращательным и поступательным движением i -го звена относительно СК0 соответственно, $I_k^{(0)}$ — тензор инерции k -го звена относительно СК0; m_k — масса k -го звена.

Для получения описанных выше характеристик были разработаны функции выделения матрицы Якоби и матрицы инерционных коэффициентов (см. рис. 21), основанные на последовательном преобразовании систем координат и вычислении текущих значений обобщенных координат.

Элементы матрицы Якоби для двухзвенного манипулятора вычисляются в следующем виде:

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}.$$

Дополним матрицу J размерности 2×2 до размера 6×2 , чтобы в дальнейшем избежать рассогласования в размерности матриц:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial q_1} & \frac{\partial \varphi}{\partial q_2} \\ \frac{\partial \theta}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta}{\partial q_2} \\ \frac{\partial \psi}{\partial q_1} & \frac{\partial \psi}{\partial q_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{ij} \\ c_{ij} \end{bmatrix}.$$

Соответственно, функция вычисления матрицы инерциальных коэффициентов имеет вид, представленный на рис. 22.

```
Inert1=R1*Ik*R1';
Inert2=R2*Ik*R2';
for i=1:1:n
    for j=1:1:n
        for k=(max(i,j)):1:n
            a(i,j)=a(i,j)+c(:,i)'*Inert(i)*c(:,j)+d(k,i)'*m(k)*d(k,j)
        end
    end
end
end
```

Рис. 22. Функция вычисления матрицы инерционных коэффициентов

На основании данных, получаемых при вычислении вышеописанных матриц, можно решить обратную задачу динамики для обобщенных сил и моментов. В результате математических преобразований, уравнения вычисления элементов вектора обобщенных сил и моментов принимают вид

$$\tau_1 = \left[\frac{1}{3} m_1 l^2 + \frac{4}{3} m_2 l^2 + m_2 \cos q_2 l^2 \right] \ddot{\theta}_1 + \left[\frac{1}{3} m_2 l^2 + m_2 \cos q_2 l^2 \right] \ddot{\theta}_2 - \frac{1}{2} m_2 \sin q_2 l^2 \dot{\theta}_2^2 - m_2 \sin q_2 l^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2;$$

$$\tau_2 = \left[\frac{1}{3} m_2 l^2 + \frac{1}{2} m_2 \cos q_2 l^2 \right] \ddot{\theta}_2 + \left[\frac{1}{3} m_2 l^2 \right] \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{2} m_2 \sin q_2 l^2 \dot{\theta}_1^2.$$

4. Моделирование взаимодействия с объектом захвата

Как было показано ранее, в момент захвата манипулятор будет испытывать ударные нагрузки. Задача управления в таком случае состоит в регулировании законов управления в соответствии с динамикой объекта захвата. Для того чтобы смоделировать ударные взаимодействия между РО и объектом захвата была использована библиотека Sim Contact Forces [8]. Библиотека содержит модели контактных сил и законы сил для моделирования в Simscape Multibody и охватывает двумерные и трехмерные задачи с трением и без.

В модель системы вводится твердотельный элемент, имитирующий объект захвата, как показано на рис. 23 и 24.

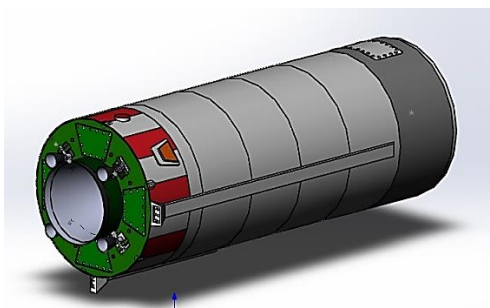


Рис. 23. 3D-модель объекта захвата

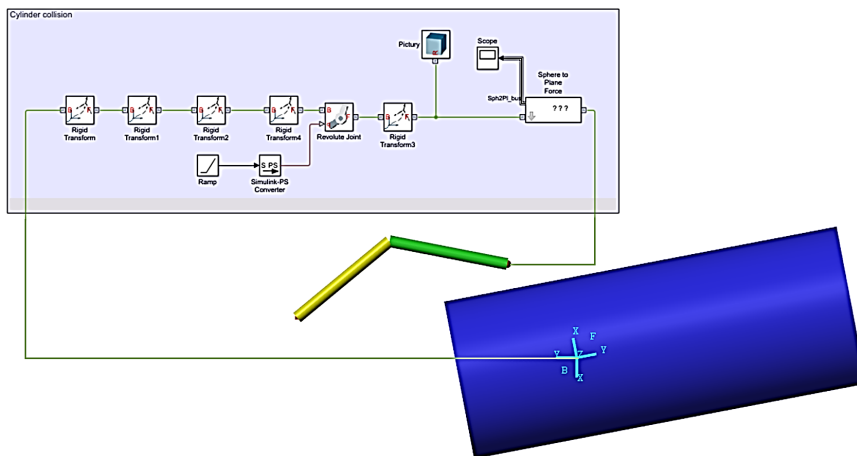


Рис. 24. Подсистема имитации захвата

Вращательный шарнир в подсистеме объекта захвата (см. рис. 24) позволяет имитировать движение объекта с угловыми скоростями, близкими к скоростям, вычисленным в результате анализа фотометрических исследований [9].

Заключение. В результате была разработана модель двухзвенного манипулятора с устройством захвата в среде MATLAB & Simulink, которая в ходе проектирования была дополнена твердотельной моделью в SolidWorks.

В модели реализованы подсистемы решения обратной задачи кинематики и обратной задачи динамики, введена подсистема взаимодействия с объектом захвата. Таким образом, реализована база для дальнейшего динамического синтеза системы управления приводными механизмами.

К рассмотрению планируется:

- формирование законов управления;
- построение нагрузочных диаграмм приводов при обработке плановых траекторий;
- динамический синтез приводов;
- разработка системы управления двуруким манипулятором.

Литература

- [1] Баранов А. А., Гришко Д. А., Чернов Н. В. Облет низкоорбитальных объектов крупногабаритного космического мусора с их последовательным уводом на орбиту захоронения. *Наука и образование: научное издание*, 2016, № 4, с. 48–64.
- [2] Лесков А.Г., Ющенко А.С. *Моделирование и анализ робототехнических систем*. Москва, Машиностроение, 1992.
- [3] Corke P. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB®*. Second, Completely Revised, Extended And Updated Edition. Springer, 2017.
- [4] *Enable Simscape Multibody Link SolidWorks Plug-In*. URL <https://www.mathworks.com/help/physmod/smlink/ref/linking-and-unlinking-simmechanics-link-software-with-solidworks.html> (дата обращения 29.11.2017).
- [5] Юревич Е.И. *Основы робототехники*. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2005.
- [6] Siciliano B., Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016.
- [7] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000, 400 с.
- [8] *Simscape Multibody Contact Forces Library*. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47417-simscape-multibody-contact-forces-library> (дата обращения 14.02.2018).
- [9] *Visual Satellite Observer's Home Page*. URL: <http://www.satobs.org/> (дата обращения 18.02.2018).

Сведения об авторе:

Мокаева Алиса Алексеевна — магистрант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 669

Математическое описание контура поперечного сечения профиля получаемого методом формовки в роликах из листовой заготовки

© Поворов Сергей Владимирович¹
Комкова Ольга Евгеньевна¹
Косовская Диана Владимировна²

povorovs@bmstu.ru
olyaamh@mail.ru
kosov-diana@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, 115035, Россия

Проектирование формующих роликов, которые являются инструментом при производстве профилей из листовой заготовки, начинается с построения сечений заготовки осевыми плоскостями будущих роликов. При построении этих сечений необходимо пройти два этапа: сначала определить размеры конструктивных элементов сечения на промежуточных стадиях формообразования, затем выполнить графическое построение всех сечений. В процессе проектирования инженер многократно изменяет способы формообразования и значения углов подгибки, добиваясь нужного результата, при этом после каждого внесенного изменения описанные выше этапы нужно выполнять заново. Для повышения производительности труда выполнение этих этапов необходимо автоматизировать, а для этого поперечное сечение заготовки должно быть описано математическим уравнением.

Ключевые слова: профиль, гнутый профиль, роликовая формовка, профилегибка

В строительстве широко применяются тонкостенные металлические балочные элементы (рис. 1), получаемые из листовой заготовки [1]. Такие балки имеют одинаковую форму поперечного сечения по всей длине и называются профилями. Сортамент и типоразмеры подобной продукции постоянно расширяется для обеспечения потребностей рынка. Для освоения новых видов продукции необходимо разрабатывать новые конструкции технологической оснастки для их производства [2].

Получение гнутых профилей возможно методом формовки в роликах [3, 4]. Листовая заготовка, проходя между парой формующих роликов (рис. 2, а), деформируется и приобретает форму повторяющую форму профиля роликов. Для получения профиля сложной формы потребуется несколько последовательных стадий формообразования. При этом заготовка будет проходить через пары формующих роликов, расположенных последовательно друг за другом (рис. 2, б, в) и, постепенно деформируясь, она будет приобретать требуемую форму поперечного сечения.

На рис. 3 показано поперечное сечение профиля в виде греческой буквы омега. Из этого рисунка можно подметить некоторые особенности поперечного сечения гнутого профиля, которые помогут при составлении математической зависимости, описывающей форму этого профиля:

- поперечное сечение профиля является контуром постоянной толщины;
- контур поперечного сечения состоит из прямолинейных и радиусных элементов;

- элементы, составляющие контур поперечного сечения, располагаются последовательно друг за другом;
- сопряжение элементов контура происходит по касательной.

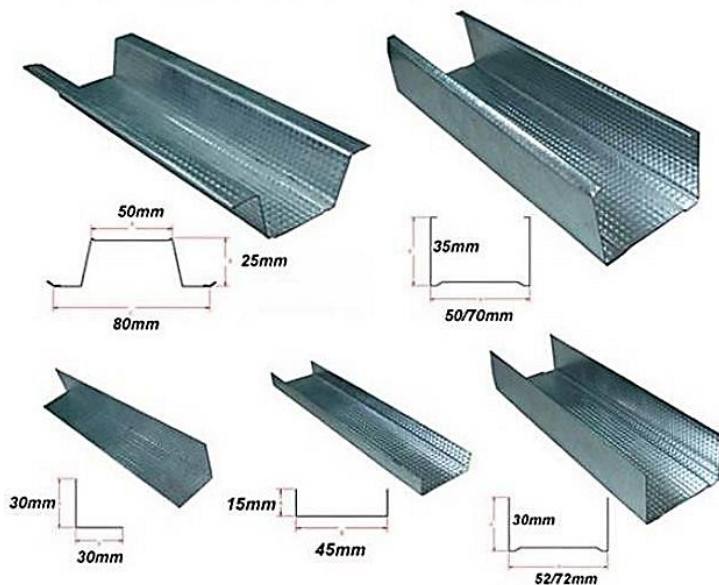


Рис. 1. Пример профилей используемых в строительстве

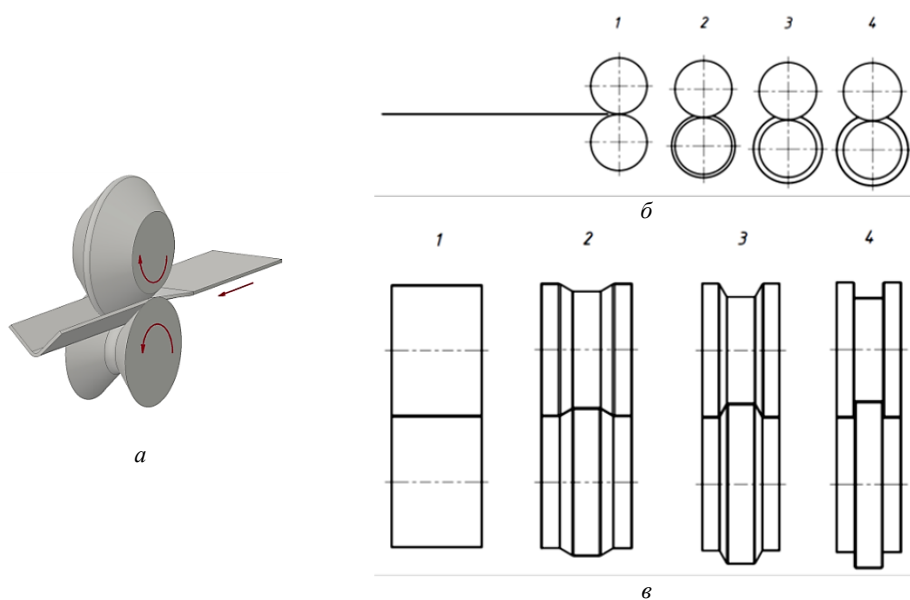


Рис. 2. Гибка листовой заготовки профилированными роликами

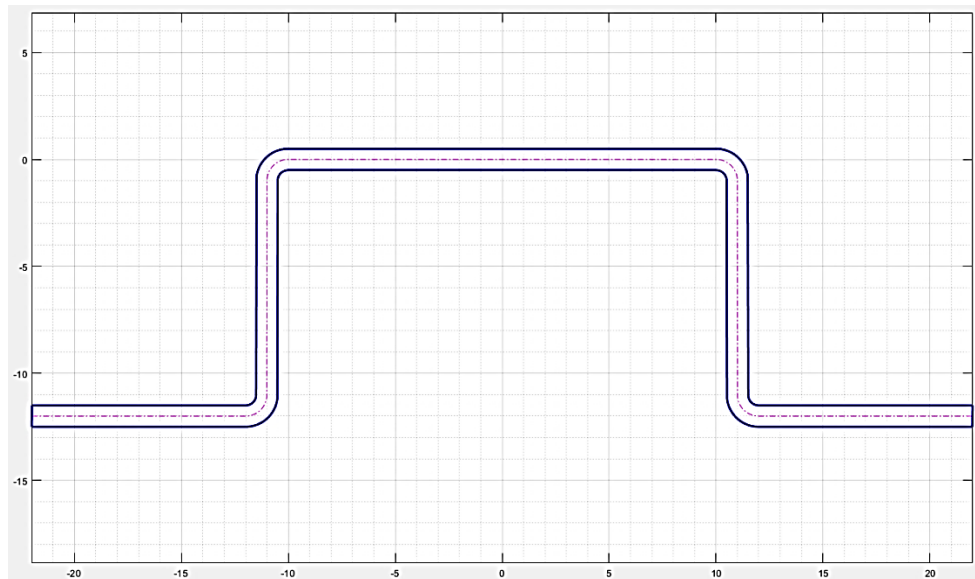


Рис. 3. Поперечное сечение Ω -профиля

Из первого пункта приведенного выше списка следует, что посередине толщины контура поперечного сечения может быть построена линия, по отношению к которой сам контур является набором эквидистантных линий. Такую линию называют профильной линией. Таким образом, задача построения контура поперечного сечения профиля может быть сведена к построению профильной линии и двух эквидистант к ней, удаленных на половину толщины заготовки. Сама профильная линия будет представлять собой кривую, состоящую из прямолинейных и радиусных участков, начало следующего участка будет совпадать с концом текущего, а угол наклона касательных к обоим участкам в точке их сопряжения будет совпадать.

Математическое описание профильной линии, которая является плоской кривой, удобнее всего проводить с использованием параметрических уравнений [5]. В этих уравнениях координаты x и y каждой точки кривой являются функциями одного параметра. В нашем случае удобнее принять за этот параметр длину, отсчитываемую от одного из концов профильной линии принятого за ее начало. Таким образом, каждая точка профильной линии будет иметь свою координату s в виде длины, на которую она отстоит от начала, а значения координат точек профильной линии будут лежать в диапазоне от нуля до значения ширины исходной листовой заготовки. Уравнения для определения координат точек профильной линии приведены ниже:

$$\rho = \rho(s); \quad (1)$$

$$\alpha(s) = \int_0^s \rho(s) ds + \alpha_{\text{нач}}; \quad (2)$$

$$x(s) = \int_0^s \cos \alpha(s) ds + x_{\text{нач}}; \quad (3)$$

$$y(s) = \int_0^s \sin \alpha(s) ds + y_{\text{нач}}. \quad (4)$$

В этих уравнениях s — координата точки профильной линии, которая является длиной профильной линии от начальной точки до данной точки; ρ — кривизна профильной линии, которая является функцией координаты s ; α — угол наклона касательной к профильной линии в точке с координатой s ; $x(s)$ и $y(s)$ — искомые координаты точки профильной линии; $\alpha_{\text{нач}}$, $x_{\text{нач}}$ и $y_{\text{нач}}$ — величины, определяющие положение профильной линии относительно системы координат, а именно: угол α наклона касательной к профильной линии в ее начальной точке и координаты x и y начальной точки.

Согласно уравнениям (1)–(4), для вычисления координат профильной линии необходимо задать закон изменения ее кривизны и координаты начальной точки, далее сами координаты могут быть вычислены путем интегрирования приведенных уравнений. Практическое применение такого подхода реализованного в программе Matlab показало, что при построении достаточно сложного профиля, у которого профильная линия состоит из большого количества элементов, в результате численного интегрирования накапливается ошибка, и в результате координаты конечной точки профильной линии могут отклоняться от точного значения на величину сопоставимую с толщиной профиля, что на практике является недопустимым. Применение большого количества точек интегрирования и более точных схем численного интегрирования не помогли кардинальным образом решить эту проблему. По этому, для повышения точности было решено найти точное аналитическое решение интегральных уравнений (3) и (4) и определять координаты точек профильной линии по этим решениям.

Расчетные схемы для определения координат точек прямолинейного и радиусного участков профильной линии приведены на рис. 4.

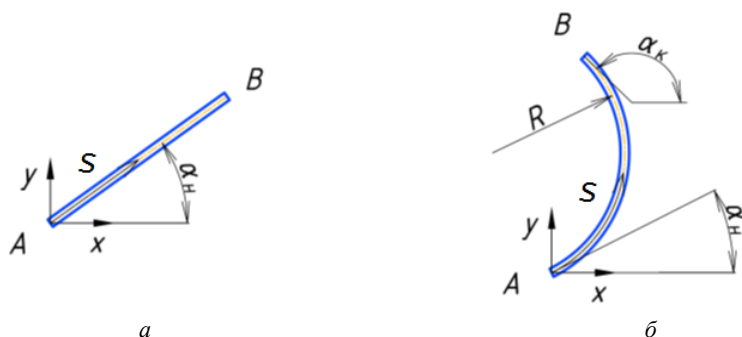


Рис. 4. Расчетные схемы для определения координат точек прямолинейного (а) и радиусного (б) элементов профильной линии

После интегрирования уравнений (3), (4) для случая прямолинейного участка профильной линии получена система уравнений

$$\begin{cases} x(s) = s \cos \alpha_H; \\ y(s) = s \sin \alpha_H. \end{cases} \quad (5)$$

Для радиусного участка система справедливы следующие выражения:

$$\begin{cases} x(s) = \frac{L}{\alpha_K - \alpha_H} \left[\sin \left(s \frac{\alpha_K - \alpha_H}{L} + \alpha_H \right) - \sin \alpha_H \right]; \\ y(s) = \frac{L}{\alpha_K - \alpha_H} \left[\cos \alpha_H - \cos \left(s \frac{\alpha_K - \alpha_H}{L} + \alpha_H \right) \right]. \end{cases} \quad (6)$$

Полученные решения удобны тем, что для их применения нет необходимости вычислять координаты центров радиусов радиусных элементов.

После того как координаты точек профильной линии вычислены по уравнениям (5), (6) контур сечения можно построить как эквидистанту к профильной линии. Для этого потребуется записать уравнение эквидистанты к плоской кривой, заданной параметрически [6]:

$$\begin{cases} x_{\text{эkv}}(s) = x(s) \pm \frac{\frac{t}{2} y'(s)}{\sqrt{(x'(s))^2 + (y'(s))^2}}; \\ y_{\text{эkv}}(s) = y(s) \mp \frac{\frac{t}{2} x'(s)}{\sqrt{(x'(s))^2 + (y'(s))^2}}, \end{cases} \quad (7)$$

где t — толщина профиля; $x'(s)$ и $y'(s)$ — производные функций координат точек профильной линии.

Для построения контура профиля необходимо построить две эквидистанты, по одной с каждой стороны профильной линии, для этого нужно выбрать соответствующий знак уравнениях. При реализации алгоритма построения контура профиля в программе MATLAB производные в выражении (7) вычисляли по определенным согласно выражениям (5), (6) координатам точек профильной линии.

После вычисления координат точек профильной линии и по уравнениям (5), (6) и координат точек контура профиля по уравнениям (7) в программе MATLAB с помощью команды plot можно построить график, показанный на

рис. 3. При этом масштаб координатных осей должен быть одинаков, это реализуется с помощью команды axis equal.

Применяя данные уравнения, можно построить контур профиля на промежуточных стадиях формообразования. Для этого потребуется задать способ формообразования и значения углов подгибки и определить недостающие значения длин и радиусов элементов профильной линии [7]. В результате получим набор контуров (рис. 5).

На рис. 5 также показаны траектории крайних точек заготовки. Они были вычислены по выражениям (5), (6) при разбиении показанных на этом рисунке шагов формообразования на более малые части.

Результаты вычислений, проведенных в MATLAB, экспортируются во внешний файл формата Excel для последующего использования в CAD-приложениях для проектирования самого инструмента.

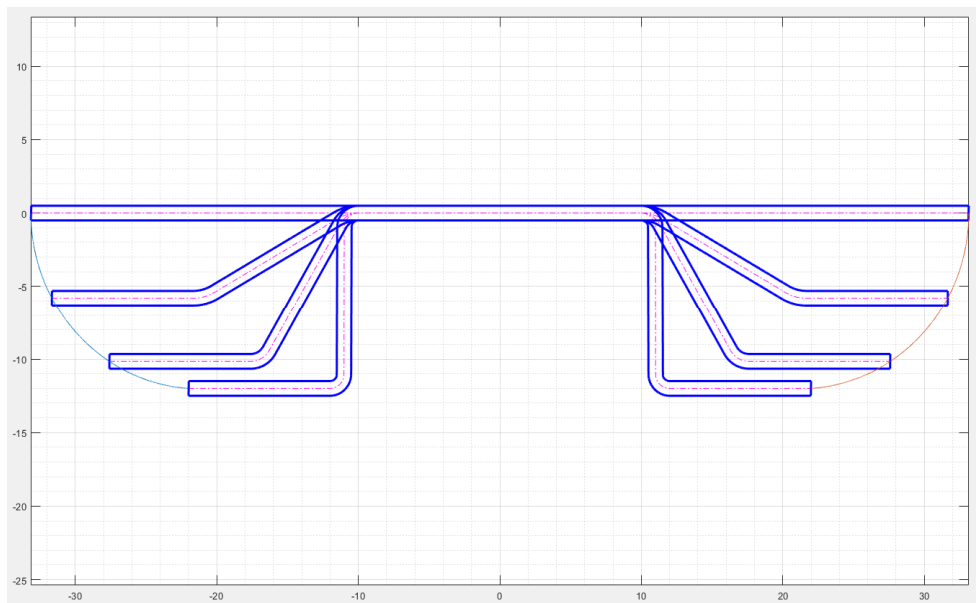


Рис. 5. Набор контуров

Выводы. Предложенные системы уравнений позволяют описать профильную линию и контур профиля аналитическим выражением, благодаря чему возможно графическое построение этих элементов как графиков функций, что ускоряет процесс графического построения и автоматизирует его.

Описание профильной линии математическим уравнением открывает возможность для дальнейшего математического исследования этой кривой: определения центра масс, моментов инерции сечения, секториальных характеристик и пр.

Литература

- [1] Соколова О.В., Комкова Т.Ю., Комков А.Е. Повышение качества поверхности особо тонкостенных труб из трубных марок сталей. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2015, № 2, с. 9–12.
- [2] Ягопольский А.Г., Комкова Т.Ю., Миронова М.О. Методы и оборудование для механической обработки кромок металлопроката для сварных труб. *Производство проката*, 2014, № 6, с. 8–11.
- [3] Соколова О.В., Лепестов А.Е., Новокшенов Д.Н. Анализ калибровки валкового инструмента при непрерывной валковой формовке труб. *Производство проката*, 2016, № 5, с. 25–27.
- [4] Хлыбов О.С., Новокшенов Д.Н., Соколова О.В., Лепестов А.Е. Моделирование процессов валковой формовки труб АО «Выксунский металлургический завод». *Сталь*, 2015, № 5, с. 67–70.
- [5] Бидерман В.Л. *Механика тонкостенных конструкций. Статика*. Москва, Машиностроение, 1977, 488 с.
- [6] *Эквидистанта и не только*. URL: <http://pmpu.ru/vf4/dets/discrim/equidist> (дата обращения 12.06.2018).

- [7] Поворов С.В. Расчет размеров профиля листовой заготовки в промежуточных переходах при формовке в роликах по заданным режимам. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2016, № 12, с. 27–32.

Сведения об авторах:

Поворов Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры МТ10 «Оборудование и технологии прокатки», МГТУ им. Н. Э. Баумана

Комкова Ольга Евгеньевна — студент кафедры ИУ8 «Информационная безопасность», МГТУ им. Н. Э. Баумана

Косовская Диана Владимировна — магистрант кафедры «Информационные технологии», РГУ им. А.Н. Косыгина

УДК 621.3+62-5+004.413.2

Разработка системы управления электропривода по методу модельно-ориентированного программирования

© | Полющенко Игорь Сергеевич

polyushenkov.igor@yandex.ru

ООО НПО «Рубикон-Инновация», Смоленск, 214031, Россия

Описана разработка микропроцессорной системы управления электропривода с применением метода модельно-ориентированного программирования и средств его реализации — системы компьютерной математики MATLAB, его компонентов и пакетов расширения. Применение указанного метода значительно упрощает и ускоряет процесс разработки программного обеспечения, делая его более наглядным и понятным для разработчиков, не имеющих опыта использования традиционных средств разработки. Показано, что средства модельно-ориентированного программирования позволяют широко использовать аппаратные и вычислительные ресурсы микроконтроллера, а также математические средства системы MATLAB для решения комплекса задач управления электрическим приводом на базе бесколлекторного электрического двигателя постоянного тока, коллекторного двигателя постоянного тока и бесколлекторного двигателя переменного тока. При этом были успешно решены задачи, связанные с формированием электромагнитного момента электрических двигателей, задачи управления движением в режимах регулирования электромагнитного момента, стабилизации скорости вращения и слежения, задачи логического управления электроприводом, а также задачи управления электроприводом в технологической системе. Испытания электропривода показали, что программное обеспечение, разработанное с применением метода и средств модельно-ориентированного программирования, по функциональности не уступает программному обеспечению, разработанному с применением традиционных средств разработки на основе структурированного текста. Разработанный электропривод может быть использован в различных системах управления движением и послужить заменой аналогичных электроприводов иностранного производства. Кроме того, результаты разработки программного обеспечения с применением метода модельно-ориентированного программирования могут быть использованы в качестве учебно-методических материалов.

Ключевые слова: система управления электропривода, модельно-ориентированное программирование, микропроцессорное управление, регулирование координат, электрический двигатель

Электроприводы (ЭП) используются в различных областях техники. Всех их объединяет наличие электрического двигателя, которым осуществляется управление. Оно должно обеспечить заданные характеристики ЭП, а именно диапазон, точность и динамику регулирования координат — электромагнитного момента, скорости, положения. Наиболее высокие требования по перечисленным характеристикам предъявляются к электроприводам систем управления движением, которые используются в станочном оборудовании, системах наведения, роботах и

манипуляторах, а также в других промышленных механизмах. Работа преимущественно в следящем режиме характерна для сервоприводов.

Материал доклада на конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем – 2018» иллюстрирует очередной этап разработки микропроцессорной системы управления электропривода, которая ведется на ООО НПО «Рубикон-Инновация» (г. Смоленск). Этот этап по сравнению с более ранними этапами [1, 2] с точки зрения управления электроприводом характеризуется более детальной проработкой алгоритма управления и более рациональным использованием программных и аппаратных ресурсов микроконтроллера, а с точки зрения модельно-ориентированной разработки программного обеспечения (ПО) — большим использованием пользовательских функций на языке C для замены схем, составленных из модельных блоков MATLAB/Simulink.

Целью работы является разработка микропроцессорной системы управления электропривода (СУЭП), которая по функциональности и характеристикам соответствует мировым аналогам. В качестве прототипа для оценки характеристик послужил сервопривод Epos2. Также целью работы было показать, что средства модельно-ориентированного программирования [3] позволяют разрабатывать полноценное и полнофункциональное программное обеспечение для управления сложной технической системой.

Научной новизной и значимостью работы над проектом можно назвать широкое использование средств модельно-ориентированного программирования для комплексной проработки всех задач, связанных с разработкой системы управления электропривода, на профессиональном уровне в отличие от обычного уровня быстрого прототипирования.

Разработка системы управления электропривода является комплексом достаточно сложных задач, связанных с суммой знаний по различным техническим дисциплинам. Рис. 1 позволяет оценить работу над системой управления электропривода по сложности и специфике поставленных задач.

Опыт разработки и результаты проектирования ЭП [1, 2] показали высокую продуктивность использования средств модельно-ориентированного программирования для генерирования кода из моделей MATLAB/Simulink, которые при этом позволяют учесть специфику микропроцессорной реализации СУЭП. В системе управления электропривода использован микроконтроллер STM32, а в качестве средства модельно-ориентированного программирования применена система компьютерной математики MATLAB и библиотека его расширения Waijung Blockset [4].

На рис. 2 показана блок-схема СУЭП, которая иллюстрирует взаимодействие программных и аппаратных средств системы управления в целом. Алгоритм управления электропривода, образующий программный уровень системы управления, реализован с использованием элементов и блоков MATLAB, а именно Simulink, State Flow, S-функций, расширенных пользовательскими C-функциями. Взаимосвязь программного математического уровня системы управления и ее аппаратного уровня осуществляется с помощью программных обработчиков периферии, которые вводятся в программное обеспечение средствами модельно-ориентированного программирования.

Кроме очевидного преимущества средств модельно-ориентированного программирования, связанного с ускорением и упрощением разработки, более значимым преимуществом их использования по сравнению с традиционными средствами разработки на основе структурированного текста является то обстоятельство, что разра-

боткой программного обеспечения продуктивно могут заниматься специалисты по теме проекта, которые не имеют профессионального уровня подготовки по программированию. Тем самым из проекта исключается работа программистов, которые чаще всего не являются специалистами по конкретной теме разработки. Выбор технологии программирования также иллюстрируется на рис. 1.



Рис. 1. Характеристика проекта по разработке системы управления электропривода

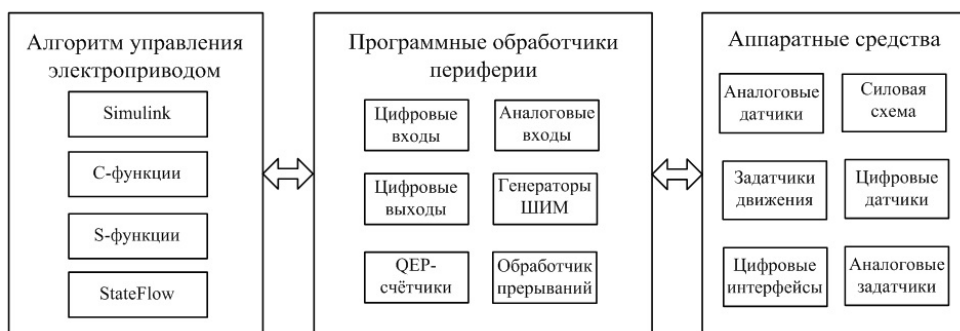


Рис. 2. Блок-схема системы управления электропривода

Согласно рис. 1 при разработке СУЭП выделено четыре крупные задачи. Электромеханическая задача связана с формированием электромагнитного момента в зависимости от типа электрического двигателя и, как следствие этого, с управлением силовым преобразователем. В СУЭП предусмотрено управление бесколлекторным

электрическим двигателем постоянного тока, коллекторным электрическим двигателем постоянного тока или бесколлекторным электрическим двигателем переменного тока. Все перечисленные типы двигателей должны иметь возбуждение от постоянных магнитов. Решение задачи управления движением требует обеспечить работу электропривода в режимах регулирования электромагнитного момента, стабилизации скорости вращения и слежения. Сюда же следует отнести формирование траектории движения и настройку регуляторов. Логическая задача связана с формированием последовательностей обработки различных событий управления и неисправностей, контрольных проверок состояния электропривода, превышения уставок тока и скорости. К терминальной задаче относится разработка информационной подсистемы для обмена данными между системой управления электропривода и системой управления верхнего уровня или персональным компьютером.

Система управления электропривода кроме электрического двигателя имеет в своем составе различные измерительные, задающие и управляющие устройства — датчики электрических и механических величин, силовой преобразователь, работающий в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения или тока для питания электрического двигателя и различные линии связи с системой управления верхнего уровня. Наличие разнообразных устройств в СУЭП приводит к тому, что при ее разработке должны быть учтены различные электромеханические и электротехнические процессы и явления. Кроме того, принципиальным является то обстоятельство, что система управления должна работать в режиме реального времени. Следовательно, при управлении электроприводом требуется учитывать наличие временных задержек и конечной величины интервалов повторения (дискретности по времени) выполнения подпрограмм. Например, при высоких скоростях вращения бесколлекторного электрического двигателя даже за время периода ШИМ питающего его напряжения угловое перемещение ротора весьма заметно влияет на своевременность переключения фаз, что, в свою очередь, может привести к снижению электромагнитного момента.

Обеспечение работы системы управления электропривода в режиме реального времени связано не только с производительностью микроконтроллера, которая оценивается по его тактовой частотой, но и с разработкой архитектуры программного обеспечения и алгоритмизацией процесса управления в целом. При этом необходимо рационально распределить программные и аппаратные ресурсы микроконтроллера, выбрать приоритеты выполнения задач, выбрать интервалы повторения подпрограмм, выбрать способы тактирования, составить последовательность выполнения задач. Кроме того, требуется согласовать алгоритм управления с временными, частотными и энергетическими характеристиками сигналов, которые система управления детектирует, обрабатывает и генерирует. Решение задач алгоритмизации связано с некоторым компромиссом между требуемым и доступным быстродействием системы управления.

Архитектурные решения ПО, примененные в системе управления электропривода, можно сформулировать следующим образом.

1. Максимально используются аппаратные средства микроконтроллера: таймеры, обработчики внешних прерываний, таймеры-счетчики, генераторы ШИМ, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), модули цифровых интерфейсов.

2. Программное обеспечение разделено на функционально завершенные подпрограммы, для которых определены приоритеты и последовательности выполнения, интервалы повторения и способы тактирования.

3. Эти подпрограммы задействуются системой управления в зависимости от типа электрического двигателя, конфигурации замкнутой системы регулирования и режима работы. Для этого предусмотрено программное изменение конфигурации аппаратных средств микроконтроллера.

4. Наивысший приоритет выполнения имеют подпрограммы, связанные с измерением токов, детектированием и обработкой аварийных событий, формированием электромагнитного момента, генерированием ШИМ.

5. Дискретные сигналы, имеющие произвольный интервал повторения, например, сигналы от датчиков Холла бесколлекторного двигателя постоянного тока и сигналы от концевых датчиков, детектируются и обрабатываются по внешним прерываниям.

6. Подпрограммы, требующие фиксированного и стабильного интервала повторения, тактируются таймерами микроконтроллера. К таким подпрограммам относятся подпрограммы регуляторов скорости и положения, подпрограммы задатчиков движения (скорости и перемещения), а также подсистемы измерения токов и напряжения.

7. Введены программные флаги, которые использованы для фиксации состояний и конфигураций СУЭП, и установлены последовательности обработки событий управления.

Средства модельно-ориентированного программирования позволили в полной мере реализовать перечисленные выше и другие архитектурные решения в исполняемой модели благодаря использованию управляемых подсистем MATLAB/Simulink, которые показаны на рис. 3. Эти подсистемы в зависимости от типа могут выполняться по прерыванию, при изменении программного флага, при выполнении некоторых условий или просто объединять помещенные в нее элементы в подпрограмму.

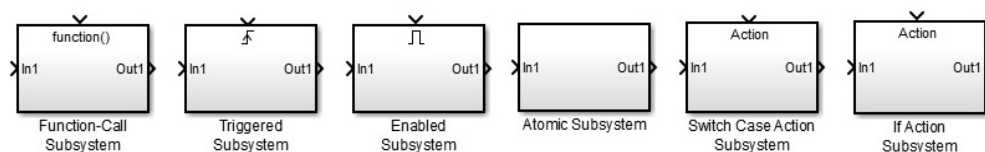


Рис. 3. Виды подсистем модельно-ориентированного программирования

Разработка архитектуры программного обеспечения и решение задач алгоритмизации с использованием средств модельно-ориентированного программирования является гораздо более важной их функцией по сравнению с генерированием кода из схемы, составленной из блоков Simulink. Далее описаны некоторые решения и результаты разработки СУЭП.

Как уже было указано, система управления обеспечивает работу электропривода с бесколлекторным двигателем постоянного тока, с коллекторным двигателем постоянного тока и с бесколлекторным двигателем переменного тока. В зависимости от типа электрического двигателя использован соответствующий алгоритм формирования электромагнитного момента, который в общем случае требует обеспечения ортогональности вектора магнитного потока и вектора тока, протекающего по цепи питания [5]. При работе с бесколлекторным двигателем постоянного тока ортогональность указанных векторов достигается путем переключения фаз в зависимости

от датчиков Холла, которые соответствующим образом установлены в двигателе. Питание электрического двигателя напряжением с прямоугольной модуляцией осуществляется от трехфазного мостового силового преобразователя (СП), схема которого показана на рис. 4, а.

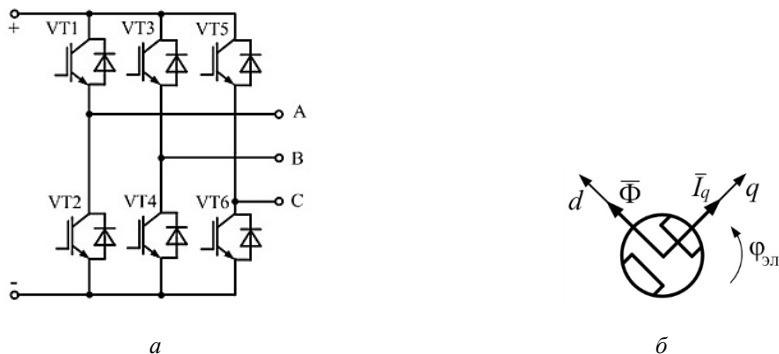


Рис. 4. Элементы управления электрическим двигателем:
 а — схема трехфазного мостового преобразователя; б — вращающаяся система осей dq бесколлекторного двигателя переменного тока

Коллекторный электрический двигатель постоянного тока включается между двумя плечами силового преобразователя, показанного на рис. 4, а. При работе с бесколлекторным электрическим двигателем переменного тока его питание осуществляется трехфазным напряжением с синусоидальной модуляцией, которое формируется в зависимости от углового положения ротора по датчику положения — энкодеру. Управление таким двигателем осуществляется в ортогональной системе координат dq , жестко связанной с ротором таким образом, чтобы ось d была направлена по его магнитной оси (рис. 4, б). При этом значение электромагнитного момента двигателя пропорционально значению тока по оси q .

Для управления силовым преобразователем в зависимости от выбранного типа электрического двигателя в ПО использованы модельные блоки, показанные на рис. 5. Скважности ШИМ во всех случаях вычисляются специальными подпрограммами, основанными на математическом описании электрических двигателей.

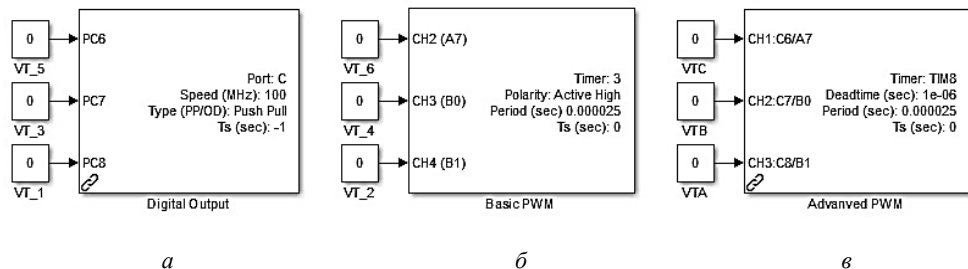
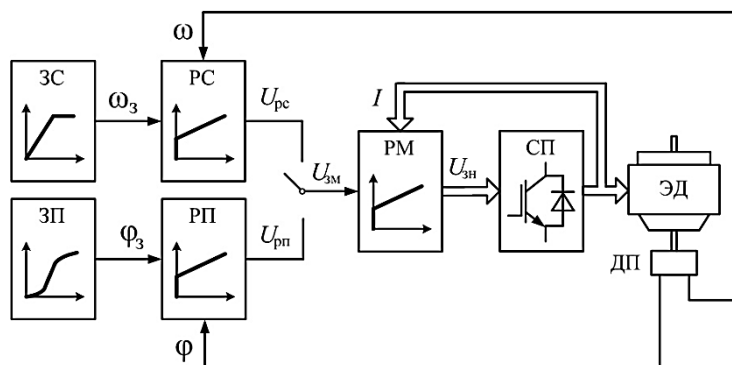
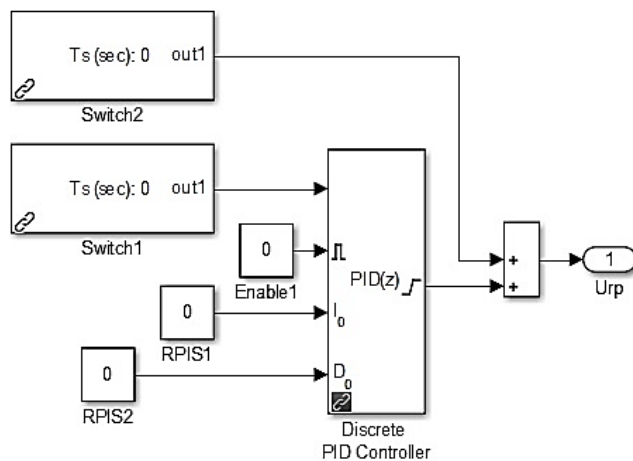


Рис. 5. Модельные блоки для управления силовым преобразователем:
 а — логическое управление; б — генератор прямоугольной ШИМ; в — генератор синусоидальной ШИМ

Задача регулирования координат требует обеспечить ограничение тока I или электромагнитного момента, стабилизацию скорости ω и регулирование положения φ в режимах слежения и позиционирования. Для ее решения использована замкнутая система с подчиненным регулированием, функциональная схема которой показана на рис. 6, а. Внутренний контур регулирования электромагнитного момента с регулятором РМ применяется для компенсации электромагнитной инерции цепи питания электрического двигателя. Для стабилизации скорости движения система управления электропривода имеет контур регулирования скорости с регулятором РС, а для работы в режиме регулирования положения — контур регулирования положения с регулятором РП.



а



б

Рис. 6. Замкнутая система электропривода:

а — функциональная схема; б — модельная подсистема регулятора положения

Для получения сигнала обратной связи использован датчик положения ДП. Регулятор электромагнитного момента (тока) является пропорционально-интегральным (ПИ), а регуляторы скорости и положения РП и регулятор скорости РС — пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД). Регуляторы электромагнитного мо-

мента индивидуальны для каждого типа двигателя, так как в них учтены особенности формирования момента, а регуляторы РС и РП общие для всех типов двигателей. Ограничение момента электрического двигателя осуществляется путем ограничения выходного сигнала регуляторов. Средства модельно-ориентированного программирования позволили осуществить программно-аппаратную реализацию регуляторов и измерителей сигналов обратных связей по току, скорости и положению.

Для программной реализации регуляторов были составлены пользовательские С-функции. Также в процессе разработки использовались стандартные модельные блоки Simulink вида PID-Controller, как показано на упрощенной схеме (рис. 6, б). Предусмотрены программные селекторы Switch1 и Switch2 для выбора источника задающего сигнала, выбора источника сигнала обратной связи и управления управляющими связями регулятора. Для корректной работы электропривода при переключении между режимами движения предусмотрена установка начальных условий регуляторов, которые вычисляются в зависимости от фактических координат движения. При измерении углового перемещения вала ЭП использован программный обработчик энкодера на базе таймера-счетчика. При отработке задающих воздействий с помощью задатчика скорости ЗС и задатчика положения ЗП обеспечено формирование процессов пуска и торможения с заданным ускорением в режиме стабилизации скорости, а также процессов отработки перемещение с заданной скоростью и заданным ускорением при формировании S-образной траектории перемещения.

В системе управления электропривода имеется информационная подсистема, которая предусмотрена для управления электроприводом от персонального компьютера ПК (UART), для взаимодействия с системой управления технологическим процессом СУТП (CAN) и обмена данными с микросхемой памяти ПЗУ (I2C). Функциональная схема информационной подсистемы показана на рис. 7. Назначением информационной подсистемы является управление электроприводом от ПК и в технологической системе, сохранение и восстановление параметров, настройка регуляторов, отслеживание координат движения, отслеживание служебной информации. Для обеспечения работоспособности информационной подсистемы предусмотрены система команд, система адресации, система параметров, протокол обмена и алгоритм обмена данными. Также предусмотрено сохранение резервной копии параметров и настроек во флэш-памяти микроконтроллера.

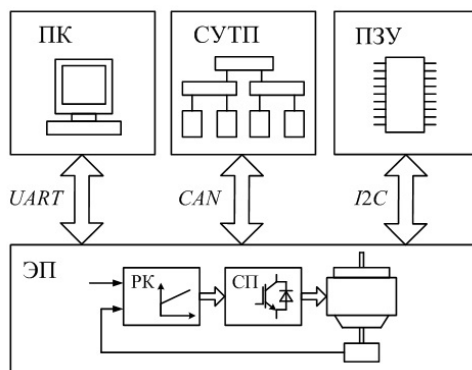


Рис. 7. Функциональная схема информационной подсистемы электропривода

Опыт использования средств модельно-ориентированного программирования для разработки информационной подсистемы показал, что от разработчика требуется только интерпретация принятых сообщений и формирование исходящих сообщений в соответствии с протоколом обмена. Доступ к линиям связи, обнаружение сообщений в буфере приемника и отправка сообщений осуществляются с помощью модельных блоков приемников и передатчиков для различных интерфейсов, которые настраиваются через меню Simulink. Это значительно упростило разработку.

В СУЭП предусмотрен автоматический контроль исправности и контроль координат движения в зависимости от выбранного типа электрического двигателя, от выбранной конфигурации замкнутой системы регулирования и от превышения аварийных уставок. Среди регистрируемых неисправностей предусмотрены превышение и понижение напряжения питания, превышение аварийной уставки скорости, превышение аварийной уставки тока, ошибки сохранения и восстановления параметров, превышение рассогласования по положению, неисправность датчиков Холла, ошибки передачи данных, неисправность энкодеров, сброс из-за тайм-аута простоя, неисправность микросхемы ПЗУ.

На рис. 8 для примера показана модельная подсистема для регистрации неисправности датчиков Холла бесколлекторного двигателя постоянного тока.

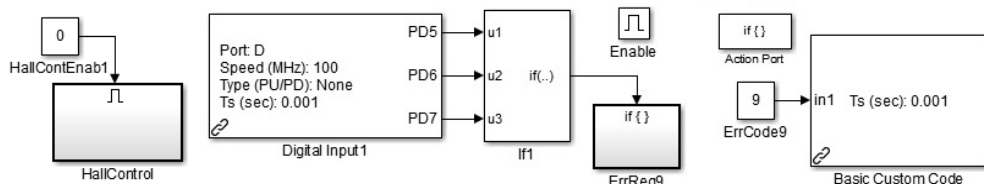


Рис. 8. Модельная схема для регистрации неисправности датчиков Холла

Для регистрации других неисправностей используются схемы, схожие с изображенной на рис. 8. Имеется флаг, в зависимости от которого разрешен или запрещен контроль параметра. С помощью пользовательской функции на языке С или с помощью блоков Simulink вычисляется логическая функция или выполняется сравнение, после чего может быть выполнена функция регистрации неисправностей, которые регистрируются в журнале событий. В зависимости от их критичности может быть, например, остановлено движение.

Разработана и изготовлена аппаратная часть системы управления — плата управления и плата силового преобразователя, которые помещаются в корпусе. Для управления и настройки электропривода от персонального компьютера разработано приложение для Windows. Оно обеспечивает весь функционал управления электроприводом и позволяет выбирать тип двигателя и конфигурацию замкнутой системы, отслеживать координаты движения в виде графиков, задавать целевые воздействия, настраивать регуляторы, отслеживать состояние исправности электропривода. Также опробована работа электропривода от системы управления верхнего уровня по шине CAN.

Ориентировочные характеристики системы управления электропривода, которые в целом аналогичны характеристиками сервопривода Epos2 с учетом разумной достаточности, приведены ниже.

Характеристики системы управления электропривода

Мощность, Вт	200
Напряжение, В	24
Частота ШИМ силового преобразователя, кГц	50
Частота выборки токов, кГц	30
Частота выборки скорости и положения, кГц	5,0
Частота дискретизации регуляторов тока, кГц	5,0
Частота дискретизации регулятора скорости, кГц	2,5
Частота дискретизации регулятора положения, кГц	2,5
Скорость обмена по CAN, Мбит/с	1,0
Скорость обмена по RS232, бит/с	115 200
Максимальная скорость бесколлекторного двигателя постоянного тока, об/мин	50 000
Максимальная скорость бесколлекторного двигателя переменного тока, об/мин	8 000
Диапазон регулирования скорости	1 : 10 000

На рис. 9 показаны временные диаграммы перемещения ϕ и скорости ω при обработке заданного перемещения для работы электропривода с формирователем S-образной траектории. Они получены с помощью указанного ранее терминального приложения. Величина перемещения выражена в импульсах по энкодеру, а время указано в виде последовательных дискретных отсчетов. Временные диаграммы демонстрируют примерное постоянство скорости в процессе движения электропривода из исходного положения в заданное, а разгон и торможение происходят с ограничением ускорения, что характерно для S-образной траектории движения в режиме позиционирования.

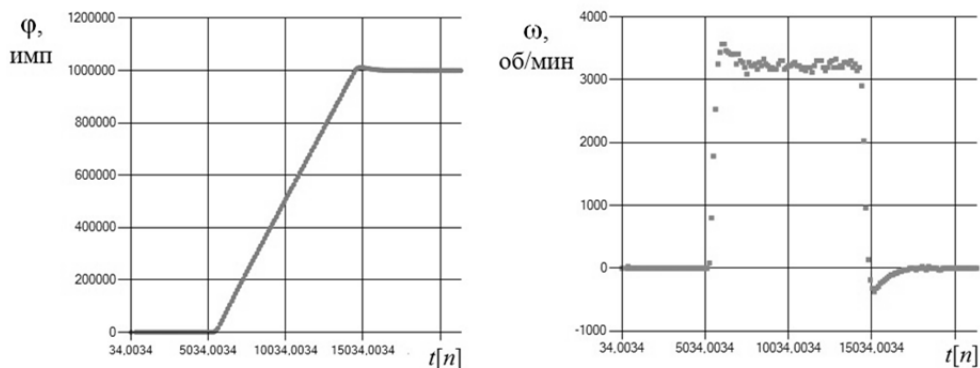


Рис. 9. Обработка электроприводом заданного перемещения

Опыт использования средств модельно-ориентированного программирования позволяет выделить некоторые сложности и ограничения, которые связаны с методикой разработки, технологией составления модели и методикой отладки. Основные из них связаны с громоздкостью моделей из блоков Simulink, отсутствием требуемых модельных блоков и обработчиков периферии, необходимостью доступа к настройкам и параметрам блоков и необходимостью конфигурирования аппаратных средств микроконтроллера при работе электропривода, некорректностью соединений стрелками при разных способах тактирования. Перечисленные ограничения средств модельно-ориентированного программирования из MATLAB были устранены путем

широкого использования пользовательских функций на языке C, которые были интегрированы в программное обеспечение системы управления электропривода.

В качестве вывода, касающегося непосредственно разработки электропривода, можно указать, что основные задачи проектирования программного обеспечения микропроцессорной системы управления были успешно решены с использованием средств модельно-ориентированного программирования. Дальнейшая работа над электроприводом заключается во всесторонней его доработке и введении алгоритма автоматической настройки по анализу отработки пробных движений. Перспективы использования средств модельно-ориентированного программирования состоят в совершенствовании модели из описанного проекта и использовании ее подсистем в качестве типовых решений в других проектах. Эта возможность имеется потому, что регуляторы, задатчики движения, обработчики периферии, обработчики обратных связей, протоколы обмена, система команд и система параметров — это типовые элементы систем управления электроприводов.

Основные выводы по проделанной работе, которые демонстрируют значимость средств модельно-ориентированной разработки для микропроцессорных систем управления техническими системами, можно сформулировать в следующем виде.

1. Средства модельно-ориентированного программирования для генерирования кода являются теми средствами разработки, которых ранее не хватало для быстрого и удобного применения на практике знаний и опыта по различным областям техники при проектировании технических систем.

2. Благодаря этим средствам разработки специалист в области систем управления электроприводами, имеющий при этом весьма скромные навыки по программированию, справится с проектированием программного обеспечения для ЭП лучше, чем профессиональный программист с весьма ограниченными знаниями по теории и системам управления, электромеханике, электротехнике и их математическому аппарату.

Литература

- [1] Полющенко И.С. Разработка системы управления электропривода на основе метода модельно-ориентированного программирования. *Вестник МЭИ*, 2016, № 6, с. 87–95.
- [2] Полющенко И.С. Разработка программного обеспечения для управления электроприводом в технологической системе с применением метода модельно-ориентированного программирования. *Вестник МЭИ*, 2017, № 4, с. 83–91.
- [3] Model-Based Design. URL: www.mathworks.com (accessed 14.07.2018).
- [4] Waijung Blockset. URL: <http://waijung.aimagin.com> (accessed 14.07.2018).
- [5] Анучин А.С. *Системы управления электроприводов: учебник для вузов*. Москва, Издат. дом МЭИ, 2015, 373 с.

Сведения об авторе:

Полющенко Игорь Сергеевич — канд. техн. наук, инженер-электромеханик, ООО НПО «Рубикон-Инновация»

УДК 004.942

Методология применения интеллектуального анализа данных в технических приложениях

© | Романова Ирина Константиновна

marti2003@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена методология применения интеллектуального анализа данных в многовариантных анализах технических систем. Отмечены большие возможности активного внедрения методов интеллектуального анализа в технические приложения, для достижения важнейшей задачи — повышения вычислительной эффективности исследований таких систем. Предложен новый взгляд на технологии интеллектуального анализа данных с точки зрения оценки степени применения в них традиционных методов и преимущества, которые должна обеспечить новая идеология. Сравнительная классификация методов традиционного и интеллектуального анализа данных позволила определить наиболее важные для технических приложений методы и способы исследований, в том числе реализуемые в пакете MATLAB.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ данных, многовариантные анализы технических систем, визуализация, эффективность вычислительных экспериментов, MATLAB

Введение. Интеллектуальный анализ данных — сравнительно новое направление развитие компьютерных технологий обработки информации. Толчком к развитию послужили огромные потоки экономической, социальной, и других видов информации, приобретшей глобальный характер. Если на заре компьютерной эры стимулом к развитию служили потребности технических приложений (яркий пример — язык FORTRAN или начальные dos-версии пакета MATLAB) то в настоящее время именно бизнес-приложения или коммуникативные задачи являются локомотивом разработки новым математических методов и алгоритмов. В качестве примеров можно привести теорию дифференциальных игр, парето-оптимальные системы, методы визуализации, распознавания текстов и многое другое. Разумеется, указанные новые методы активно применяются и в технических приложениях.

Традиционный параметрический анализ данных является одним из основных инструментов исследования технических систем. Его можно определить, как многовариантный анализ, направленный на изучение влияния внешних и внутренних параметров системы на качество ее функционирования, определяемое с помощью прямых и косвенных критериев качества. Конечной целью многовариантного анализа является выявление областей в пространстве параметров, при которых обеспечивается приемлемое качество системы. При этом выдвигается требование вычислительной эффективности процедур реализации параметрического анализа [1].

Одним из путей достижения этого важнейшего требования является активное внедрение методов интеллектуального анализа в технических приложениях. Отметим основные исходные позиции, с которых можно охарактеризовать многовариантный анализ технических систем.

Первая особенность процесса исследований состоит в том, что для задач со многими параметрами, которые также могут изменяться статистически и динамически, формируются большие объемы информации, в том числе динамические потоки при исследовании нестационарных систем. В настоящее время устоявшимся термином можно признать понятие BigData. Работе с большими объемами данных посвящена статья [2].

Передовым средством хранения и извлечений больших объемов информации являются технологии OLAP (Online Analytical Processing) [3]. Среди огромного объема литературы можно, например, указать работу [4], в которой помимо традиционных подходов приводится решение задачи сокращения объема данных при сохранении качества извлекаемой информации. Областью применения таких технологий являются бизнес-потоки, экономическая и социальная сферы. Однако большой интерес также представляет адаптация OLAP для обработки сугубо технической информации, и в частности, данных траекторных исследований полета ЛА [5].

Еще один активно применяемый подход в хранении и извлечении данных, тесно связанный с OLAP — это многомерные кубы (Data Cube) [6, 7]. В настоящее время задача решается как специальными средствами работы с базами данных, так и общетехническими программными продуктами. Применение MATLAB для взаимодействия с DataCube приводится в [8].

Рассматриваемые задачи являются частью современной комплексной дисциплины Data Mining [9]. Данные больших размеров надо не только получать и хранить, в конечном итоге их надо анализировать [10]. В Data Mining эти задачи тесно увязаны, причем последнее является существеннейшей и неотъемлемой частью концепции.

Литература по проблемам Data Mining в настоящий момент весьма широка, однако основной упор делается преимущественно на экономические и социологические проблемы. Между тем проблемы параметрических исследований технических систем и, в частности, систем управления, предлагают большое поле для применения новых технологий.

В данной статье предложен внимательный взгляд на новые технологии с точки зрения оценки степени применения в них традиционных методов и преимущества, которые должна обеспечить новая идеология.

Сравнительный анализ методов и средств Data Mining и задач многовариантного анализа технических систем. Интеллектуальный анализ данных Data Mining — мультидисциплинарная область, возникшая и развивающаяся на базе таких наук, как прикладная статистика, распознавание образов, искусственный интеллект, теория баз данных и др. На рисунке показана общепринятая классификация задач Data Mining.

Полученные знания признаются необходимыми для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности. При этом остро встает вопрос о том, что такое Data Mining: модное течение или новое качество исследований? В чем новизна — в комплексировании информации, в методологии получения, проверки, хранения, обработки передачи данных? Чем обычный многовариантный анализ отличается от Data Mining?

Предлагается следующий ответ на поставленный вопрос.

Во-первых, следует отметить нацеленность на достижение практического результата, а именно прогнозирования развития процессов функционирования систем, наступления благоприятных или неблагоприятных событий. В технических системах это сохранение робастности системы, в том числе в неблагоприятных условиях, отка-

зы системы, потеря устойчивости, неоправданно высокие затраты на производство и эксплуатацию систем.



Data Mining как мультидисциплинарная область

Простой многовариантный анализ не всегда имеет четкие конечные цели. Это своего рода разведка. Но это не отменяет необходимости повышения эффективности проводимых вычислительных экспериментов. Поэтому применение стратегий Data Mining в исследованиях технических систем будет способствовать достижению заданной цели.

Инструменты Data Mining в настоящее время доступны во многих программных продуктах. Однако целесообразным является использование одного программного комплекса, в рамках которого можно было реализовать все процедуры анализа, синтеза систем на уровне математических моделей, генерации программных кодов, их передачи в реальную аппаратуру, полунатурного моделирования в реальном времени. Таким продуктом является на сегодняшний день MATLAB. Использование инструментов Data Mining является органичным продолжением исследований в рамках созданных моделей.

Первичной информацией при этом являются данные, в том числе и те, что используются для визуализации. Они всегда могут быть представлены как совокупности, т. е. множество кортежей или многокомпонентных объектов данных. Некоторые совокупности могут быть интерпретированы как функции. Достаточно часто на практике визуализируемые данные имеют статистическую природу.

Данные. Данные могут быть получены в результате измерений, экспериментов, арифметических и логических операций. Поскольку в технических приложениях часто используются так называемые сигналы, введем дополнительно еще ряд понятий, характерных для цифровой обработки сигналов.

Физический сигнал будем определять, как обнаруживаемую (или измеряемую) физическую величину или импульс (типа напряжения, силы тока или напряженности магнитного поля), которая может быть передана как сообщение или как информация. Сигнал редко имеет такую физическую форму, что может быть непосредственно измеренным. Сигнал, который после определенной обработки преобразован в цифры, называется цифровым. Возможно, эти цифровые сигналы связаны с реальными аналоговыми сигналами, но вероятно, что между ними и нет связи. Из анализа задач обработки специального вида данных, а именно сигналов, следуют и более общие выводы.

Данные должны быть представлены в форме, пригодной для хранения, передачи и обработки. Отличие данных от информации состоит в том, что данные - это исходный материал, информация специальным образом формируется на основе полученных данных.

По критерию постоянства своих значений в процессе решения поставленной задачи данные могут быть переменными или постоянными. Переменные в задачах исследования технических систем — это, во-первых, текущие параметры движения объекта (фазовые координаты), во-вторых — меняющиеся со временем параметры самого объекта (аэродинамические силы, сила тяги и т. п.). В-третьих, изменяющиеся внешние воздействия на систему. Разделение параметров системы на внешние и внутренние активно используется при исследовании робастности и чувствительности систем. Постоянные данные в моделировании систем — это номинальные (паспортные) данные, которые используются при решении задач в детерминированной постановке. Методы статистических исследований в сочетании с такими методами искусственного интеллекта, как нечеткая логика, позволяют проводить полноценные исследования реально протекающих процессов, которые затем можно успешно визуализировать.

Данные, в зависимости от тех функций, которые они выполняют, могут быть: справочными, оперативными, архивными. Справочными данными являются, например, паспортные характеристики исполнительных двигателей, датчиков, редукторов и т. п. Оперативные данные получаются в процессе моделирования систем. Ярким примером архивных данных являются телеметрическая информация, данные многократных летных испытаний, наборы многовариантных анализов влияния параметров системы, внешних и внутренних факторов, которые затем можно использовать в задачах оптимизации без повторных моделирований.

Данные также бывают первичными и вторичными. Вторичные данные - это данные, которые являются результатам определенных вычислений, примененных к первичным данным. Вторичные данные, как правило, приводят к ускоренному получению ответа на запрос пользователя за счет увеличения объема хранимой информации. Первичные данные получают непосредственным измерением (наблюдением). Первичные данные могут быть получены также в ходе вычислительных экспериментов. В моделировании летательных аппаратов важнейшими являются данные об аэродинамических характеристиках, полученные в ходе натурных или вычислительных экспериментов. Эти данные могут быть отнесены к первичным, в то время, как текущие характеристики, полученные, например, путем выборок из таблиц для данного набора параметров движения (скорости, высоты полета и т. п.) будут уже вторичными. Альтернативой может служить непосредственный расчет аэродинамических характеристик по принятым моделям, однако это представляется чрезвычайно вычислительно затратным и гораздо эффективнее пользоваться результатами заранее проведенных расчетов.

Действия над данными. Действия над данными в концепции Data Mining — это основа, и фундаментальная характеристика, позволяющая выделить ее в самостоятельную междисциплинарную область. Возможны четыре аспекта работы с данными: определение данных, вычисление (измерение), манипулирование (форматное преобразование) и обработка (сбор, передача и др.). Подготовка данных может составлять до 75 % всех манипуляций с данными. В процессе Data Mining присутствуют элементы сравнения, типизации, классификации, обобщения, абстрагирования, повторения.

Можно признать, что Data Mining вобрал в себя концепцию моделирования как метода познания. В настоящее время характерно широкое проникновение метода моделирования как способа научного познания реальной действительности, причем для каждой из областей науки и техники характерны свои специфические модели.

Традиционный подход к моделированию систем и концепция Data Mining предусматривают следующие этапы:

- анализ предметной области;
- постановка задачи;
- подготовка данных;
- построение моделей;
- проверка и оценка моделей;
- выбор модели;
- применение модели;
- коррекция и обновление модели.

Анализ предметной области. Создание модели является важнейшим этапом не только задачи моделирования, но и более широких исследований в технологии Data Mining на этапе изучения предметной области.

Более широкая трактовка этого этапа в Data Mining подразумевает, что знания из различных источников должны быть формализованы при помощи каких-либо средств. Важность разработки адекватной поставленной задачи модели важна не только в моделировании, но и в эффективном использовании Data Mining в целом.

Постановка задачи. Постановка задачи Data Mining включает следующие шаги:

- формулировка задачи;
- формализация задачи.

Постановка задачи включает также описание статического и динамического поведения исследуемых объектов. Описание статики подразумевает описание объектов и их свойств. При описании динамики описывается поведение объектов и те причины, которые влияют на их поведение. Динамика поведения объектов часто описывается вместе со статикой. Для исследования технических систем и в частности систем управления характерно описание задачи в виде динамического объекта. Динамический объект — это объект, выход которого зависит не только от текущего значения входных сигналов, но и от их значений в предыдущие моменты времени. Иногда этапы анализа предметной области и постановки задачи объединяют в один этап.

Зачастую этап постановки задачи в технических приложениях является одним из самых сложных, поскольку далеко не всегда исследователю дается готовая модель исследуемой системы.

Подготовка данных. Специальное выделение подготовки данных в отдельный этап является неотъемлемой и главной особенностью технологии Data Mining, которое отличает ее от обычных многовариантных исследований. Считается, что качественная подготовка данных обеспечивает хороший результат всего процесса Data Mining.

Этап ввиду его важности и сложности разбивается на ряд шагов:

- определение и анализ требований к данным;
- сбор данных.

Для сверхбольших объемов данных используются специальным образом организованные хранилища данных, что делает анализ проще и эффективней. Однако далеко не всегда, особенно в технических приложениях, имеются хранилища данных. В технических системах при формировании требований в рамках задач многокритери-

альной оптимизации для поддержания ЛПР (лица принимающего решение), могут использоваться знания экспертов.

Данные в общем случае являются распределенными во времени и пространстве, причем под пространством понимается как физическое трехмерное пространство, так и многомерное пространство параметров.

Появление параллельных и конвейерных систем, необходимость моделировать процессы функционирования не только аппаратных, но и программных средств привело к появлению класса дискретных ММ, называемых сетями Петри. Сети Петри можно использовать для моделирования на функционально-логическом и системном уровнях проектирования широкого круга систем и сетей.

Еще одним важнейшим примером массивов данных являются результаты многовариантных исследований технических систем, в которых в качестве многомерного пространства входных данных выступают параметры динамической системы, такие как масса, моменты инерции, характеристики исполнительных двигателей, а также параметры корректирующих устройств, а также наборы входных детерминированных управляющих, детерминированных и случайных контролируемых воздействий, а также возмущений. Набор выходных данных — это фазовые координаты системы, а также вектор критериев качества ее функционирования, который формирует исследователь в соответствии с поставленной задачей.

В особую группу данных, которые используются в рамках цифровой обработки сигналов (ЦОС), включаются так называемые временные ряды.

Безотносительно предметной области данные подразделяют на упорядоченные и неупорядоченные. В рамках Data Mining упорядоченные данные соотносят с понятием временных рядов, хотя этот же термин используется в ЦОС несколько в другом смысле.

Сбор данных для Data Mining требует дополнительной оценки наличия сезонной/циклической компоненты. В случае присутствия в наборе данных сезонной/циклической компоненты, необходимо иметь данные как минимум за один сезон/цикл. При анализе временных рядов ЦОС это требование остается в силе, но еще более ужесточается. Важнейшим параметром при проведении исследований временных рядов является образцовая частота, т.е. скорость выборки, определяемая числом выборок в секунду. Обозначим ее F_s . Если интервал выборки обозначить через T_s , то $F_s = 1/T_s$. Особую роль играет величина $F = F_s/2$, называемая частотой Найквиста. Смысл этого параметра рассмотрим на простом примере: для того, чтобы распознать (т.е. отделить ее от других) любую гармонику, необходимо на одном периоде ее изменения наблюдать не менее двух точек, т.е. частота измерения должна быть не менее, чем в 2 раза выше частоты исследуемого процесса. Очевидно, для данной частоты наблюдений можно правильно распознать только те процессы, частота которых меньше, чем частота Найквиста.

Если данные не упорядочены, т.е. события из набора данных не связаны по времени, в ходе сбора данных следует соблюдать следующие правила. Недостаточное количество записей в наборе данных может стать причиной построения некорректной модели. С точки зрения статистики, точность модели увеличивается с увеличением количества исследуемых данных. Возможно, некоторые данные являются устаревшими или описывают какую-то нетипичную ситуацию и их нужно исключить из базы данных.

В многовариантных исследованиях технических систем понятие неупорядоченных данных имеет дополнительный смысл. Для повышения эффективности вычисления

тельных экспериментов используются специальные способы генерирования пробных точек в пространстве параметров, а именно равномерно распределение последовательности. Результатом будут неупорядоченные наборы данных, для визуализации которых применяются специальные средства на базе алгоритмов Вороного, Дейкстры и др. Для работы с табличной формой неупорядоченных данных используются специальные таблицы сортировки.

Общим требованием при использовании многих алгоритмов необходимо определенное (желательное) соотношение входных переменных и количества наблюдений. Количество записей (примеров) в наборе данных должно быть значительно больше количества факторов (переменных).

Набор данных должен быть репрезентативным и представлять, как можно больше возможных ситуаций. Пропорция представления различных примеров в наборе данных должны соответствовать реальной ситуации. В технических приложениях эффективный способ удовлетворить данное требование при сохранении приемлемого количества генераций наборов данных — применение равномерно распределенных последовательностей.

Предварительная обработка данных. Data Mining в отличие от традиционных методов статистики может работать с любыми данными, но очевидное желание получить качественный анализ требует проведения предварительной обработки данных, которая является необходимым этапом процесса Data Mining. Любое использования понятия «качество» требует обязательного формирования критериев качества.

Имеются ряд способов обработки пропущенных данных. Кратко перечислим их:

- исключить из анализа объекты с пропущенными значениями;
- рассчитать новые значения для пропущенных данных;
- игнорировать пропущенные значения в процессе анализа;
- заменить пропущенные значения возможными значениями.

Приведем несколько примеров из задач исследования технических систем. В задачах многокритериальной оптимизации одной из проблем, которая решается в рамках современных алгоритмов, является увеличение плотности фронта Парето. Специальные методы используются в спектральном и корреляционном анализе, например, частичное перекрытие отрезков временных рядов для расчетов периодограмм.

Шумы и выбросы. Выбросы — резко отличающиеся объекты или наблюдения в наборе данных. Шумы и выбросы являются достаточно общей проблемой в анализе данных. Выбросы могут как представлять собой отдельные наблюдения, так и быть объединенными в некие группы. Задача аналитика — не только их обнаружить, но и оценить степень их влияния на результаты дальнейшего анализа. Если выбросы являются информативной частью анализируемого набора данных, используют робастные методы и процедуры. Достаточно распространена практика проведения двух-этапного анализа — с выбросами и с их отсутствием — и сравнение полученных результатов. Различные методы Data Mining имеют разную чувствительность к выбросам, этот факт необходимо учитывать при выборе метода анализа данных. Также некоторые инструменты Data Mining имеют встроенные процедуры очистки от шумов и выбросов.

В технических приложениях, в частности, при построении систем управления, имеются специальные алгоритмы оптимального оценивания, например, фильтр Калмана, который позволяет не только оценить процессы, имеющие случайные составляющие, очистить данные измерений от шумов наблюдателя, но и использовать полученные данные для формирования управляющих сигналов. В цифровой обработке

сигналов одним из центральных средств является синтез цифровых фильтров, обеспечивающий подавление шумов.

Визуализация данных как мощный инструмент Data Mining, позволяет представить данные, в том числе и выбросы, в графическом виде.

В технических системах натурные и/или вычислительные эксперименты часто производятся в несколько этапов или несколькими исследователями одновременно. Более того, при моделировании сложных систем актуальным является запуск параллельных вычислений на многоядерных процессорах или вычислительных кластерах. Соответствующий программно-аппаратный интерфейс предусматривает последующее объединение полученных массивов данных. Коды очистки, например, на базе цифровой фильтрации, могут быть написаны как на специальных языках DSP-контроллеров или ПЛИС, так и на языках MATLAB и др.

Подтверждение. На этом этапе определяется правильность и эффективность процесса и определений преобразования. Это осуществляется путем тестирования и оценивания, например, на примере или на копии данных источника, — чтобы выяснить, необходимо ли как-то улучшить эти определения. При анализе, проектировании и подтверждении может потребоваться множество итераций, например, в связи с тем, что некоторые ошибки становятся заметны только после проведения определенных преобразований.

Преобразования. На этом этапе осуществляется собственно преобразование либо в процессе для загрузки и обновления базы данных, либо при ответе на запросы.

При моделировании технической системы в реальном времени в качестве запросов будут выступать данные о текущих значениях возмущающих сил и моментов, например, аэродинамических нагрузок в зависимости от параметров движения летательного аппарата.

Противоток очищенных данных. После того как ошибки отдельного источника удалены, загрязненные данные в исходных источниках должны замениться на очищенные. При этом должен быть задействован механизм перенаправления улучшенных данных в соответствующие унаследованные приложения, так чтобы не требовалось в будущем повторной очистки.

Методы и алгоритмы Data Mining. Несмотря на разнообразие методов и алгоритмов Data Mining, среди них можно выделить основные:

- искусственные нейронные сети;
- деревья решений;
- символьные правила;
- методы ближайшего соседа и k-ближайшего соседа;
- метод опорных векторов;
- байесовские сети;
- линейная регрессия;
- корреляционно-регрессионный анализ;
- иерархические и неиерархические методы кластерного анализа;
- методы поиска ассоциативных правил;
- метод ограниченного перебора;
- эволюционное программирование и генетические алгоритмы;
- разнообразные методы визуализации данных.

В представленном перечне основных методов и алгоритмов Data Mining присутствуют в большинстве своем известные математические алгоритмы и методы. Тем не менее технология Data Mining претендует на новизну. Признано, что новым является

возможность комплексного использования этих методов при решении тех или иных конкретных проблем, которое также стало возможным с появлением новых технических и программных средств.

Анализ этапов реализации технологии Data Mining показал, что она позволяет более глубоко исследовать технические системы. При этом пересекающимися или просто совпадающими являются проблемы, представленные в таблице. Поскольку удобным и полным программным продуктом при этом является пакет MATLAB, отмечены соответствующие инструменты. Также даны ссылки на работы автора, в которых методы реализованы на практике.

Этап реализации технологии Data Mining	Метод многовариантного анализа технических систем	Программный продукт семейства MATLAB [16]
Data Mining	Многовариантный анализ технических систем	MATLAB [16]
Статистика	Статистические исследования технических систем [11]	Statistics and Machine Learning Toolbox
Визуализация	Визуализация результатов многовариантного анализа [12, 13]	Statistics and Machine Learning Toolbox Simulink 3D Animation
Обработка изображений	Обработка изображений в задачах навигации роботов, в частности прокладки траекторий БПЛА	Image Acquisition Toolbox Image Processing Toolbox Signal Processing Toolbox
Нечеткая логика	Нечеткая логика в задачах идентификации в задачах управления, в задачах многокритериальной оптимизации [14]	Fuzzy Logic Toolbox
Базы данных	Базы данных в хранении экспериментальных данных, например, траекторных расчетов [11]	Database Toolbox
Специальные средства анализа многомерных данных	Обработка многокритериальной информации: выделение кластеров, факторный анализ, метод главных компонент, корреляционный и регрессионный анализ [14, 15]	Statistics and Machine Learning Toolbox Signal Processing Toolbox

Выводы. Показано внутренне единство задач интеллектуального анализа данных и исследования технических систем. Отмечены наиболее продуктивные технологии Data Mining с точки зрения исследования технических систем. Показано, что технологии активно реализуются в программном продукте MATLAB. Направление дальнейших исследований: планомерная и всеобъемлющая реализация технологий для полного анализа и синтеза контурных технических систем.

Литература

- [1] Романова И.К. Повышение эффективности вычислительных экспериментов при моделировании движения летательных аппаратов. *Наука и образование: научное издание*, 2017, № 7. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0717.0001269>

- [2] *The Manager's Guide to Solving the Big Data Conundrum. The Math Works*. 2016. URL: <https://www.mathworks.com/campaigns/products/offer/big-data-for-managers.html> (дата обращения 02.03.2018).
- [3] Федоров А., Елманова Н. *Введение в OLAP*. 98 с. URL: http://kek.ksu.ru/eos/DW/OLAP_Microsoft.pdf (дата обращения 29.01.2018).
- [4] Mateen M., Chaudhary L. Reduce the Wastage of Data During Movement in Data Warehouse. *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), October 2016, vol. 152, no 8, pp. 20–24.
- [5] Subrahmanyam P. High-Fidelity Aerothermal Engineering Analysis for Planetary Probes Using DOTNET Framework and OLAP Cubes Database. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Aerospace Engineering Volume*, 2009, Article ID 326102, 21 p. DOI: 10.1155/2009/326102
- [6] *Проектирование кубов данных*. URL: [https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/ms175641\(v=sql.105\).aspx](https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/ms175641(v=sql.105).aspx) (дата обращения 25.12.2017).
- [7] *Многомерные кубы*. URL: http://kek.ksu.ru/eos/DW/OLAP_Microsoft.pdf (дата обращения 25.01.2018).
- [8] *Data Cube-Matlab Interface. User Manual*. Berkeley Water Center. 11/10/2008. URL: <http://www.fluxdata.org/BWC20Cube-MatlabInterface.pdf> (accessed 20.02.2018).
- [9] Чубукова И.А. *Data Mining*. Москва, НОУ «Интуит», 2016, 471 с.
- [10] Барковский С.С., Захаров В.М., Лукашов А.М., Нурутдинова А.Р., Шалагин С.В. *Многомерный анализ данных методами прикладной статистики: учеб. пособие*. Казань, Изд-во КГТУ, 2010, 126 с.
- [11] Романова И.К., Соловьев В.С. Параметрические исследования динамики некоторых видов, деформированных тел. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2016, № 5–6, с. 90–97.
- [12] Романова И.К. Современные методы визуализации многомерных данных: анализ, классификация, реализация, приложения в технических системах. *Наука и образование: научное издание*, 2016, № 3. DOI: 10.7463/0316.0834876
- [13] Романова И.К. Сравнительный анализ и модификации методов визуализации в параметрических исследованиях систем управления. *Наука и образование: научное издание*, 2017, № 1. DOI: 10.7463/0117.0000926
- [14] Романова И.К. Основные подходы к выбору состава материала путем многокритериальной оптимизации. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2017, № 7, с. 14–18.
- [15] Малышева Г.В., Романова И.К. Оптимизация выбора параметров, характеризующих состояние объекта, при решении задач надежности. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2015, № 6, с. 33–38.
- [16] MATLAB. URL: <https://www.mathworks.com/> (accessed 12.08.2018).

Сведения об авторе:

Романова Ирина Константиновна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана

Содержание

<i>Бошляков А.А., Вельтищев В.В., Зубков А.Ю., Пахомов Т.К., Перминова Е.А.</i> Проектирование виртуальных лабораторных электромеханических стендов	3
<i>Власов А.И., Кривошеин А.И., Филин С.С.</i> Универсальная интеллектуальная система поддержки технического обслуживания и предиктивного ремонта объектов частного домохозяйства в рамках концепции интернета вещей	12
<i>Власов А.И., Юлдашев М.Н.</i> Анализ противоречий синтеза распределенных сенсорных сетей	20
<i>Воевода Н.Н., Лапин Д.В.</i> Разработка системы управления приводами ног шагающего робота при статическом перемещении в концепции адаптивной локомоции	30
<i>Голдинова К.А.</i> Разработка робототехнической системы для покраски поверхности цистерн	42
<i>Гоношилов Д.С., Сергеева Н.А., Соловьев В.А.</i> Обобщенная методика оценки показателей качества электрорадиоаппаратуры в среде MATLAB	52
<i>Крайнов И.А.</i> Применение среды MATLAB для анализа экономической эффективности инвестиционных проектов	62
<i>Лапин Д.В., Шавырин И.Б.</i> Идентификация силового привода при неизвестном порядке исследуемого звена	66
<i>Лобач А.Ю.</i> Программный контроллер движения на базе системы реального времени с использованием интерфейса связи Ethernet	74
<i>Мокаева А.А.</i> Моделирование системы управления исполнительным мехатронным модулем манипулятора	81
<i>Мокаева А.А.</i> Подходы к созданию модели манипулятора в Simulink	90
<i>Поворов С.В., Комкова О.Е., Косовская Д.В.</i> Математическое описание контура поперечного сечения профиля получаемого методом формовки в роликах из листовой заготовки	106
<i>Полющенко И.С.</i> Разработка системы управления электропривода по методу модельно-ориентированного программирования	113
<i>Романова И.К.</i> Методология применения интеллектуального анализа данных в технических приложениях	124

Научное издание

V ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОТЛАДКИ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

Корректор *С.А. Серебрякова*
Художник *Э.Ш. Мурадова*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 28.11.2018. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 11,9. Тираж 50 экз. Заказ .

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru www.baumanpress.ru

ООО ЦИТМ «Экспонента»
115088, Москва, 2-й Южнопортовый пр-д, д. 31, стр. 4.
press@exponenta.ru exponenta.ru/

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.