

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия архитектуры
и строительных наук
Ассоциация строительных вузов
Правительство Белгородской области
Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова

**Международная научно-практическая
конференция, посвященная 65-летию
БГТУ им. В.Г. Шухова**

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
И ИННОВАЦИИ
(XXIII научные чтения)**



**Сборник докладов
Часть 10**

**29 апреля
Белгород 2019**

УДК 001.2
ББК 72+65.291
М 43

Наукоемкие технологии и инновации: эл. сб. докладов
М 43 Междунар. науч.-практ. конф., Белгород: Изд-во БГТУ, 2019.
– Ч. 10. – 176 с.

ISBN 978-5-361-00698-4

В сборнике представлены результаты исследований, направленных на автоматизацию и оптимизацию технологических процессов и производств на базе современных технологий, методов и технических средств.

Материалы сборника предназначены для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и производственных организаций и могут быть полезны для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов вузов.

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, проф. В.Г. Рубанов, канд. техн. наук, доц. А.Г. Бажанов.

УДК 001.2
ББК 72+65.291

ISBN 978-5-361-00698-4

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Авербух М.А., Попов С.А. Имитационное моделирование электропривода динамических нагнетателей со скалярным законом регулирования	6
Авербух М.А., Фальков Г.А. Особенности имитационного моделирования электропривода по системе тиристорный преобразователь-двигатель	12
Бушуев Д.А., Воронежский Д.С. Оценка влияния дефекта зубьев планетарной передачи на динамику мотор-колеса мобильной платформы	17
Бушуев Д.А., Кузубов А.С. Разработка лабораторной весоизмерительной системы	22
Бушуев Д.А., Огурцов С.Н., Решетников В.О. Построение и верификация математической модели объекта в САР уровня жидкости в лабораторной установке	27
Долженко А.В., Балык В., Поляков А.И., Каргалов А.В. Применение мультиспектральной аэрофотосъёмки в комплексе с нейросетью для автоматизации мониторинга в сельском хозяйстве ..	33
Долженко А.В., Каргалов А.В., Балык В., Поляков А.И. Обследование зданий и сооружений при отсутствии физической доступности объекта используя БПЛА	38
Долженко А.В., Поляков А.И., Балык В., Каргалов А.В. Разработка автоматизированной системы детекции гусениц капустной белянки по результатам мультиспектральной съемки	44
Каригов Е.Б., Кузнецов Д.С. Разработка автоматизированной системы управления макетом складского помещения с порталными манипуляторами, основанной на микроконтроллерном управлении	51
Каригов Е.Б., Родионов А.Ю. Разработка системы распознавания фонем на основе мел-кепстральных коэффициентов	57
Каригов Е.Б., Рухубовский А.В. Моделирование работы привода мотор-колеса роботизированной тележки	61

Кижук А.С., Глущенко А.С., Гольцов Ю.А. Моделирование промышленного робота-манипулятора «Kawasaki RS080N» в среде MSC Adams.....	66
Кижук А.С., Гольцов Ю.А. Энергоэффективное широтно-импульсное управление нагревательной установкой.....	71
Кижук А.С., Гольцов Ю.А., Гончаров Н.А. Математическая модель температурного поля нагревателя высокой мощности с учетом граничных условий	75
Кижук А.С., Гольцов Ю.А., Куклик В.С., Набоков А.В. Реализация структуры управления мощной нагревательной установкой на базе ПЛК Segnetics SMH 2G	80
Крюков А.В., Хрипунов М.В. Разработка программного средства для идентификации параметров объекта управления.....	84
Невинцын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Корсакова Н.Э. Управление концентрацией целевого продукта в химическом реакторе с применением нелинейного робастного алгоритма.....	89
Порхало В. А., Валеева Н.С. Разработка модели многосвязного объекта в форме нейронной сети.....	94
Рыбин И.А., Вакуленко И.Р. Разработка системы управления движением мобильного робота по заданной контрастной линии	100
Рыбин И.А., Маньшин И.М. Разработка автономной колесной платформы для лабораторных исследований.....	104
Сельская И. В., Саливон Ю.И. Мультимедийные технологии моделирования технологических строительных процессов в преподавании дисциплины автоматизация.....	109
Семернин А.Н., Аверкин Н.С. Особенности разработки вибрационного привода мобильного устройства.....	115
Соловьев В.В., Гасанова Н.В., Волков И.М. Пластификатор на основе рапсового масла для получения эластомерных композиционных материалов	120
Сапрыка А.В., Сингатулин Р.С. Методы улучшения спектральных и динамических характеристик цифровых источников электромагнитных колебаний дизелькомнатных систем.....	127
Степовой А.А., Медведев А.М. Разработка системы управления мобильным роботом с гусеничным шасси	132
Трушин Н.Н., Лисицин В.Н. Стойкость инструмента при контурном фрезеровании стеклотекстолита.....	136

Чернышов Н.Н., Сапрыка В.А., Бердников М.Н., Нивин А.И. Исследование режимов работы IGBT транзисторов при высокочастотном преобразовании электрической энергии	141
Чернышов Н.Н., Салманов В.П., Гребенников М.В., Смирнов К.Л. Исследование методов снижения динамических потерь на IGBT транзисторах программным комплексом COMSOL MULTIPHISICS-5.2.....	150
Чернышов Н.Н., Салманов В.П., Рыжкин П.П., Лысенко А.С. Исследование процессов восстановления гармонических сигналов на IGBT транзисторах с использованием широтно-импульсной модуляции.....	157
Чернышов Н.Н., Куюмчиев М.С. Статические и динамические характеристики биполярных транзисторов с изолированным затвором	165
Юдин Д.А., Ващенко Р.А., Черняев М.Ю. Разработка имитационной модели системы управления беспилотным летательным аппаратом с использованием ros, gazebo	172

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ

Авербух М.А., д-р техн. наук, профессор,
Попов С.А.

*Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье описывается процесс разработки имитационной модели современного частотно-регулируемого электропривода динамических нагнетателей со скалярным управлением, а также его анализ, при помощи программного пакета Matlab с графической средой моделирования Simulink и библиотекой для симуляции электроэнергетических систем SimPowerSystems.

Ключевые слова: электропривод, имитационное моделирование, скалярное управление, динамические нагнетатели.

В настоящее время наблюдается глобальный переход от нерегулируемого асинхронного электропривода к регулируемому, так как он более энергоэффективен. В данный момент большая часть динамических нагнетателей, а именно насосов, вентиляторов, компрессоров, используются в составе нерегулируемого электропривода и работают неэкономично. Потери электроэнергии составляют 15-20% от потребляемой электроэнергии [1]. Для снижения потерь электроэнергии целесообразно применение экономных способов регулирования. Одним из таких способов является частотное регулирование. Основным методом применяемый в частотном регулировании динамических нагнетателей – скалярный. Частотные преобразователи со скалярным законом управления очень просты в реализации, не требуют сложных датчиков и ресурсоемких вычислений. Скалярный метод регулирования основан на принципе изменения по определенному закону частоты питающего напряжения совместно с его амплитудой, например в динамических нагнетателях используют закон $\frac{U}{f^2} = const.$

Механические характеристики частотно-регулируемого ЭП, работающего на вентиляторную нагрузку показаны на рис. 1. Несмотря на очевидные преимущества использования скалярного регулирования для управления динамическими нагнетателями, он обладает и определенными недостатками, такими как: малый диапазон

регулирования по скорости и невозможность одновременного управления скоростью и моментом.

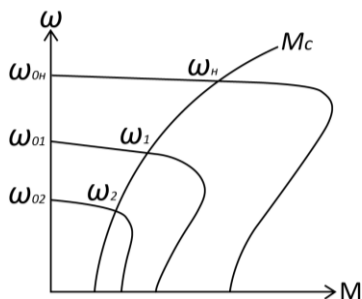


Рисунок 1 - Механические характеристики электропривода при вентиляторной нагрузке

Для систем автоматического управления, скалярные законы обычно применяют со стабилизацией какого либо параметра: потокосцепления статора, потокосцепления ротора, главного потокосцепления. Проще всего реализовать на практике вариант скалярного управления со стабилизацией потокосцепления статора. Известно, что причиной уменьшения потока в двигателе при скалярном управлении является падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. Для устранения влияния активного сопротивления используют IR-компенсацию, которая позволяет убрать негативные моменты, связанные с падением напряжения на активном сопротивлении обмоток статора, тем самым увеличивая жесткость получаемых механических характеристик [2].

Для разработки и тестирования различного электропривода чаще всего прибегают к моделированию, как к наиболее рациональному методу, позволяющему заменить исследуемую систему математической моделью, которая с достаточной точностью может описать систему. Этот метод очень удобен тем, что не требует наличия реального объекта, а так же множества датчиков для фиксации токов и напряжений, протекающих в системе; скорости вала и момента на валу. Также, при проектировании есть риск вывести реальное оборудование из строя, если допустить ошибки в расчетах, чего можно полностью избежать при математическом моделировании системы. Быстро развивающаяся в последнее время компьютерная техника позволяет не рассчитывать модели вручную, а используя пакеты специальных программ производить моделирование процессов любой сложности, что

крайне облегчает процесс проектирования электроприводов любых назначений. Такие программы дают возможность наглядно исследовать как отдельные объекты, так и целые системы, при минимальных материальных и трудовых затратах.

Рассмотрим в качестве примера моделирование асинхронного электропривода центробежного насоса с применением скалярного закона регулирования и IR-компенсацией. Принципиальная схема такого электропривода изображена на рис. 2. На представленной схеме можно выделить силовую часть, а именно выпрямитель, инвертор на IGBT транзисторах, асинхронный электродвигатель. Остальные элементы относятся к системе управления.

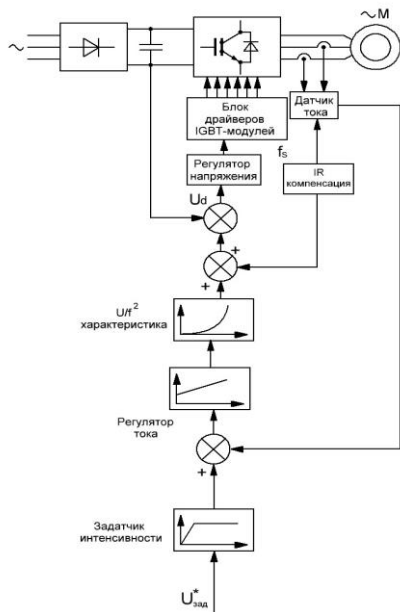


Рисунок 2 - Принципиальная схема асинхронного электропривода со скалярным законом регулирования

Данную принципиальную схему можно преобразовать в функциональную схему, представленную на рис.3.

В состав функциональной схемы входят:

ЗИ – задатчик интенсивности; ФП – функциональный преобразователь, реализующий скалярный закон U/f^2 ; ПЧ – преобразователь частоты; РТ – регулятор тока; ДЭ – электрическая часть электропривода;

R_1 – активное сопротивление статора; ДТ – датчик тока; Дм – механическая часть электропривода [3].

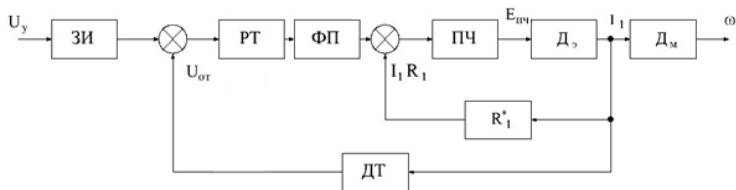


Рисунок 3 - Функциональная схема управления электроприводом

На основании составленной функциональной схемы построим структурную схему, представленную на рис. 4.

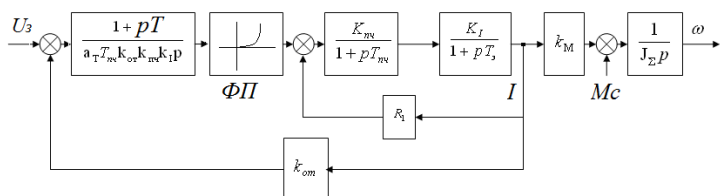


Рисунок 4 - Структурная схема управления электроприводом

На основании данной структурной схемы можно собрать модель в программе Matlab/Simulink, но используя дополнительные библиотеки, можно более качественно моделировать и изучать протекающие в подобных сложных системах процессы. Одной из таких библиотек является SimPowerSystems (SPS), ориентированная на моделирование электромеханических систем. Несомненным достоинством Simulink является то, что сложные электрические системы можно собирать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть инвертора на IGBT транзисторах можно взять из библиотеки SPS, а систему управления собрать из стандартных блоков среды Simulink. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического анализа, позволяет сильно упростить процедуру моделирования для сложных систем. Кроме того, в модели можно использовать функции самого MATLAB, что дает практически безграничные возможности для моделирования электротехнических систем [4].

На рис.5. представлена схема имитационной модели с использованием электродвигателя ПЭДВ 4-144 применяемого для ЭП насосных установок. Управление ЭП происходит по закону $\frac{U}{f^2} = const$ с

IR-компенсацией, которые реализованы в Control System. Подробнее система управления показана на рис. 6. По результатам проведенного моделирования (рис. 7.) можно увидеть, что ЭП разогнался до номинальной скорости за 1с, при этом ток не превышает номинальные значения.

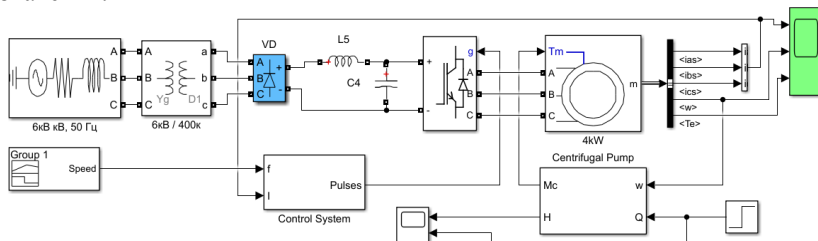


Рисунок 5 - Имитационная модель электропривода

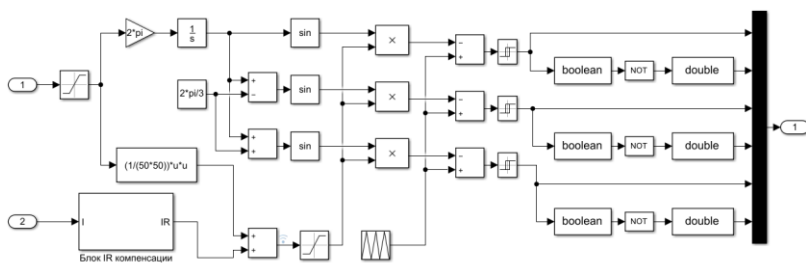


Рисунок 6 - Скалярная система управления с IR-компенсацией

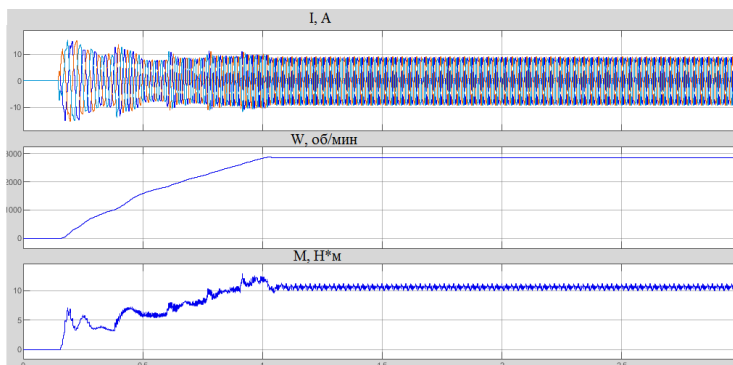


Рисунок 7 - Результаты имитационного моделирования электропривода насоса

Список литературы:

1. Лезнов Б.С. Оценка эффективности регулируемого электропривода в насосных установках // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. №3. С. 58-65.
2. Фащиленко В.Н Регулируемый электропривод вентиляторных и насосных установок М: Издательство «Горная книга», 2011. 264с.
3. Авербух М.А. Проектирование частотно-регулируемого электропривода динамических нагнетателей: учебное пособие / М.А. Авербух, А.Н. Семернин. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 98с.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие. СПб.: Корона принт, 2001. 320 с.

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СИСТЕМЕ ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ

**Авербух М.А., д-р техн. наук, профессор,
Фальков Г.А.**

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье рассказывается, как разработать имитационную модель электропривода по системе ТП-Д в программном комплексе Matlab с пакетом расширений Simulink, при помощи которой можно произвести настройку регулятора и снятия осциллограмм скорости, тока якоря, момента с высокой точностью и информативностью.

Ключевые слова: электропривод, ТП-Д, подъемная установка, настройка регулятора, МПСУ, имитационное моделирование.

В горнодобывающей промышленности широко применяются подъемные установки. Тахограмма движения подъемного сосуда выполняется за счет электропривода (ЭП). При этом в качестве ЭП могут использоваться приводы постоянного и переменного тока.

Широкое применение находит ЭП постоянного тока по системе тиристорный преобразователь – двигатель (ТП-Д). Система ТП-Д обладает абсолютной управляемостью, высокой точностью выполнения тахограммы, небольшими массогабаритными показателями, высокой надежностью, обеспечивает широкий диапазон регулирования скорости.

В ЭП подъемных установок применяется замкнутая система управления ТП-Д, где для точности позиционирования координат ЭП необходимо произвести настройку регулятора. При аналитическом расчете в виду сложности описания системы нелинейными дифференциальными уравнениями, осуществить точную настройку затруднительно. Подбор параметров настройки регуляторов целесообразно произвести с помощью имитационного моделирования [1].

Актуальной целью становится создание имитационной модели. Данный метод моделирования позволяет использовать фактические или ожидаемые системы, когда эксперименты на реальных системах не являются невозможными или практичными, либо находятся в процессе замены нескольких компонентов системы [2].

В комплект современных систем ЭП входят соответствующие контроллеры и средства управления. Функциональная схема с микропроцессорными программируемыми средствами управления (МПСУ) системы ТП-Д представлена на рис. 1 [4].

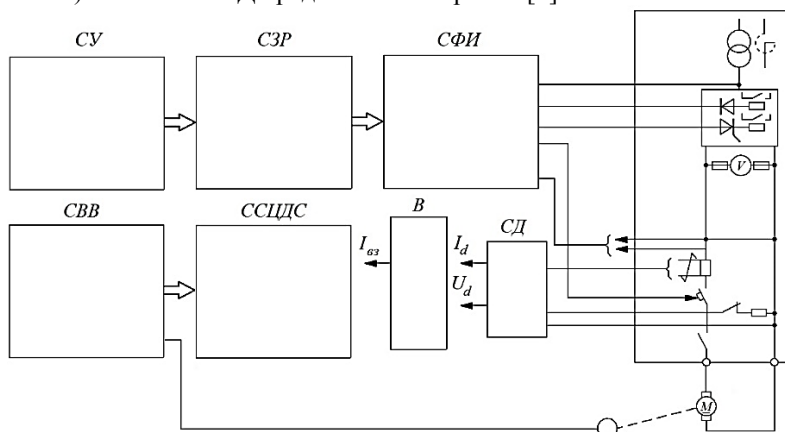


Рисунок 1 - Функциональная схема системы ЭП подъема с МПСУ

В состав функциональной схемы входят:

- СУ – система управления;
- СЗР – система защиты и регулирования;
- СФИ – система формирователей импульсов;
- СВВ – система входа и выхода;
- ССЦДС – система связи с цифровым датчиком скорости;
- СД – система датчиков.

МПСУ реализует базовые структуры САР скорости, ЭДС, положения с различными типами аналоговых, импульсных и кодовых датчиков.

В МПСУ предусмотрена [6]:

- самонастройка регуляторов;
- самодиагностика средств управления (степень диагностирования до неисправного модуля);
- изменение конфигурации системы регулирования с помощью встроенного пультового терминала;

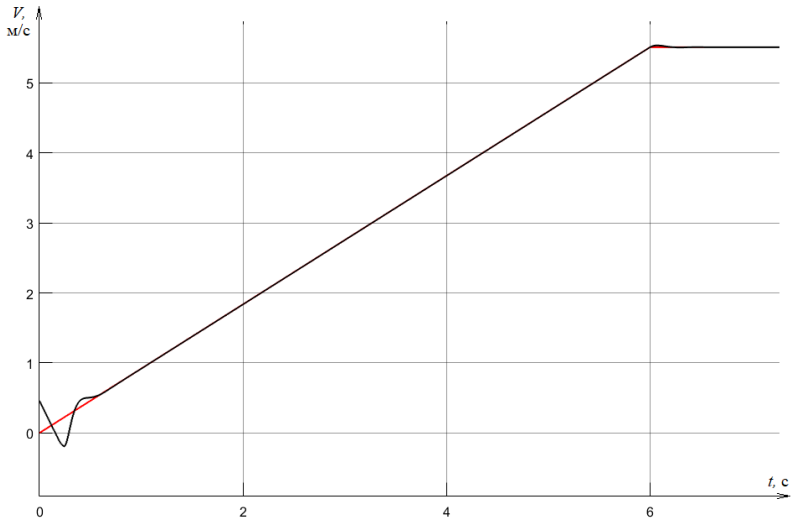


Рисунок 3 - Осциллограмма имитационного моделирования скорости

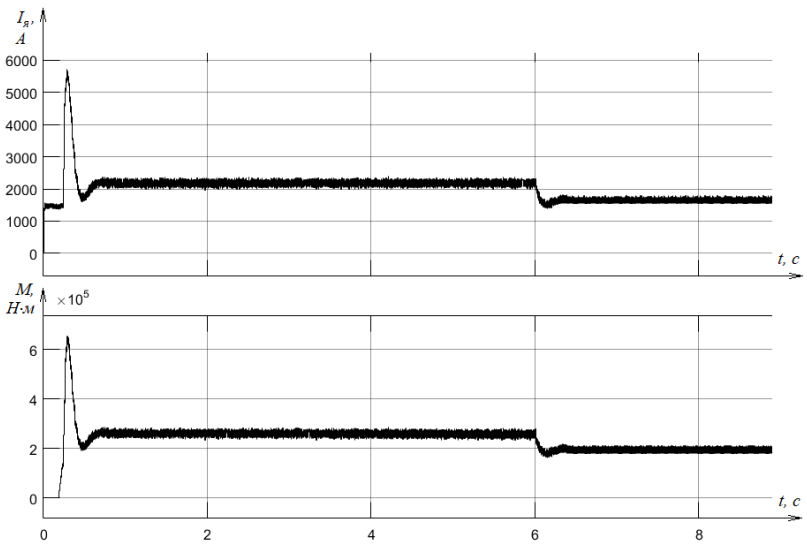


Рисунок 4 - Осциллограммы имитационного моделирования тока якоря и момента

Список литературы:

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
2. Зайцев В. С., Харланов О. В. Адаптивная система управления электроприводом грузоподъемного механизма крана // Вестник Призовского государственного технического университета. Технические науки. – 2009. – №.19. – С. 215 – 217.
3. Авербух, М.А. Автоматизированный электропривод многоканатной подъемной установки. – Норильск, 2006. – 145 с.
4. Микитченко А. Я. Разработка управляемого электропривода по системе ТП-Д для машин предприятий горнодобывающей промышленности // Вестник Оренбургского государственного университета. – 1999. – №. 3. – С. 108 – 109.
5. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
6. Микитченко А. Я. Разработка управляемого электропривода по системе ТП-Д для машин предприятий горнодобывающей промышленности // Вестник Оренбургского государственного университета. – 1999. – №.3. – С. 108 – 109.
7. Малиновский А. К., Ткаченко П. В. Модернизация электропривода механизма передвижения грузоподъемных кранов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – №. 5. – С. 252 – 254.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТА ЗУБЬЕВ ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ДИНАМИКУ МОТОР-КОЛЕСА МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Бушуев Д.А., канд. техн. наук, доцент,
Воронежский Д.С., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье приведен анализ влияния дефекта зубьев планетарной передачи на динамику мотор-колеса мобильной платформы. Приведены твердотельные модели планетарных передач с дефектом зубьев эпицикла, построенные в среде MSC Adams и интегрированные в мотор-колеса мобильной платформы. Получены и проанализированы динамические характеристики при отсутствии от одного до трех зубьев эпицикла.

Ключевые слова: дефект зубчатой передачи, планетарная передача, мотор-колесо, контактные силы, Adams.

Благодаря преимуществам планетарной передачи, таким как большое передаточное отношение, высокое отношение крутящего момента к весу и коаксиальный вал, планетарные редукторы широко используются в различных промышленных приложениях: робототехнике, авиа- и машиностроении. В мобильной платформе, разрабатываемой на кафедре технической кибернетики [1], в мотор-колесах используются пластиковые планетарные передачи, которые могут быть повреждены из-за превышения номинальной нагрузки, наличия абразивных частиц, несоосности валов и накопления усталостных напряжений [2].

Несмотря на причину, основными типами дефекта являются деформация зуба, его стачивание или полное разрушение, которое ведет к перераспределению рабочей нагрузки на поверхности.

В программе MSC.Adams была создана твердотельная модель роботизированной мобильной платформы (рис.1) с мотор-колесом, в который входит планетарный редуктор задаваемый в различных вариациях: без дефектов (рис.2.а), с дефектом одного (рис. 2.б), двух (рис. 2.в), трех (рис. 2.г) зубьев эпицикла.

Данные модели позволяют получить информацию об изменении динамических характеристик мотор-колеса, такие как изменение контактных сил между зубьями планетарных зубчатых колес и

кольцевой частью редуктора, крутящих моментов требуемых для поддержания заданной скорости.

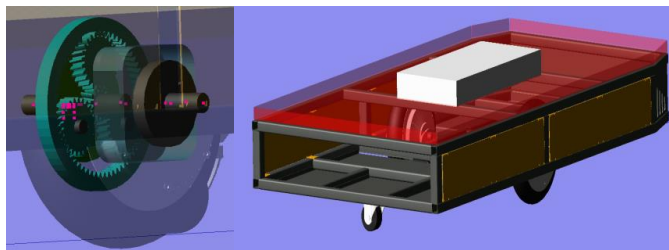


Рисунок 1 - Модель планетарного редуктора мотор-колеса роботизированной мобильной платформы

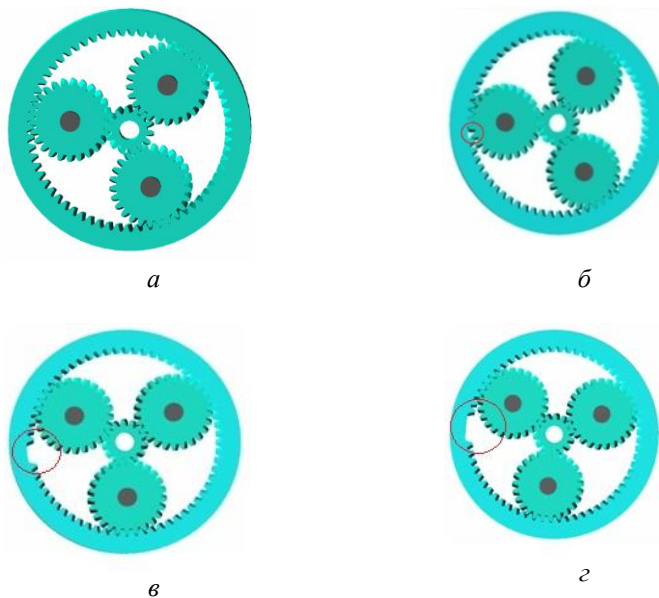


Рисунок 2 - Твёрдотельная модель планетарного редуктора: *а* – без дефекта; *б* – отсутствие одного зуба на кольцевой части, *в* – отсутствие двух зубьев на кольцевой части, *г* – отсутствие трех зубьев на кольцевой части

После построения твердотельной модели было проведено моделирование режима холостого хода, и получены графики контактных сил между планетарными зубчатыми колесами и кольцом редуктора (рис. 3).

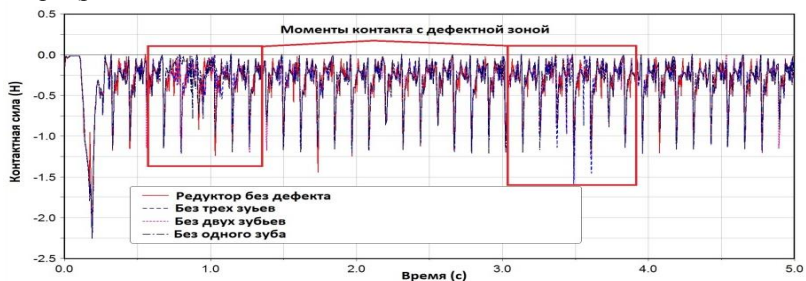


Рисунок 3 - Проекция контактных сил на ось аппликата при режиме холостого хода

В результате моделирования режима холостого хода было выявлено, что произошло увеличение контактных сил между зубьями при отсутствии двух зубьев в 1.5-2 раза, а при отсутствии трех – нагрузка увеличилась в 3-5 раз. Данный результат указывает, что на этапе проектирования и изготовления необходимо ввести корректировки характеристикам материала, таким как жесткость и износостойкость, если существует необходимость обеспечения функционирования планетарного редуктора в случаях полного стачивания или поломки зуба зубчатой передач, поскольку изменение контактных сил в большую сторону приводит к снижению его срока службы [4-5].

Для анализа влияния на динамические характеристики мотор-колеса при его установке в роботизированную мобильную платформу с планетарным редуктором без дефекта и с отсутствующими тремя зубьями на кольцевой части редуктора, поскольку это наиболее распространенный вариант и в данном случае происходит полная потеря контакта одной из планет и кольца. Результат моделирования представлен на рис.4, где приведены контактные силы всех планет и кольца планетарного редуктора.

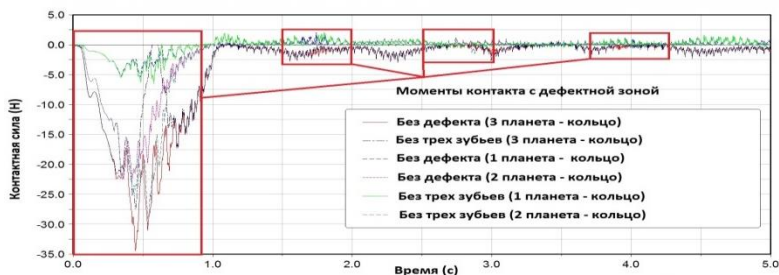


Рисунок 4 - Проекция контактных сил на ось абсцисс под нагрузкой

Полученные данные позволяют сделать выводы, что потеря контакта на одной из планет с кольцом приводит к значительному увеличению нагрузок на зубья других планет и кольца (в 1.5-2 раза), что в свою очередь приведет к продолжению разрушения редуктора и приведению его в полную негодность [6-7].

Для анализа влияния дефектов трех зубьев эпицикла планетарного механизма на динамику мотор-колеса с бесколлекторным двигателем постоянного тока и системой автоматического управления скоростью вращения [8], установленного в роботизированную мобильную платформу (см. рис. 1) было выполнено совместное моделирование динамики в средах Adams и Simulink результаты которого представлены на рис.5.

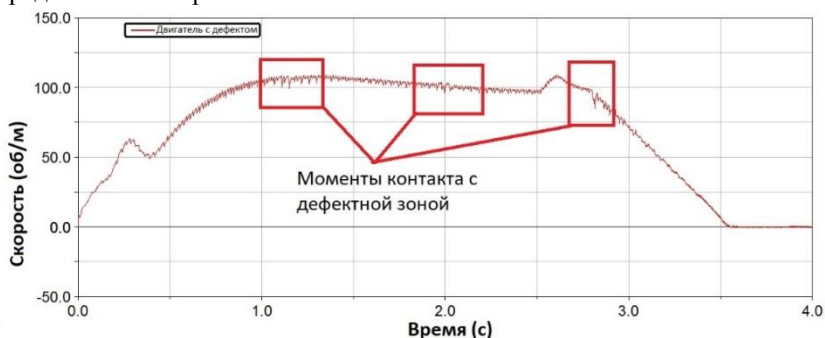


Рисунок 5 - Скорость вращения двигателя с дефектом

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что дефект зубьев в планетарной передаче оказывает влияние не только на контактные силы, но и на скорость вращения, что приносит в систему

дополнительное негативное возмущающее воздействие, которое приводит к отклонению от заданной траектории при движении и к снижению точности определения и контроля продольного отклонения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6.

Список литературы:

1. Бажанов А.Г. Моделирование сенсорной подсистемы автоматически управляемого транспортного средства для складских систем / А.Г. Бажанов, Д.А. Бушуев, А.С. Пикалов, С.В. Алексеевский // Сб. трудов XXXI Междуна. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-31)». Т.8. Саратов: Изд-во Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., 2018. С.30-35.
2. Классификация повреждений зубчатых передач [Электронный ресурс]. URL: <https://eam.su/klassifikaciya-povrezhdenij-zubchatyx-peredach.html> (дата обращения: 30.03.2019).
3. Скопинский В.Н., Захаров А.А. Сопrotивление материалов: учебное пособие. Часть I. М.: МГИУ. 1999. 128с.
4. Liang X., Zuo M.J., Liu L. A windowing and mapping strategy for gear tooth fault detection of a planetary gearbox, Mech. Syst. Signal Process. 80 (2016). 445–459.
5. M. Inalpolat, A. Kahraman, A theoretical and experimental investigation of modulation sidebands of planetary gear sets, J. Sound Vib. 323 (2009). 677–696.
6. Meltzer G., Ivanov Y.Y. Fault detection in gear drives with non-stationary rotational speed-part II: the time-frequency approach, Mech. Syst. Signal Process. 17 (2003) 273–283.
7. Mark W.D., Hines J.A. Stationary transducer response to planetary-gear vibration excitation with non-uniform planet loading, Mech. Syst. Signal Process. 23 (4) (2009). 1366–1381.
8. Бушуев Д.А., Рубанов В.Г., Коренева Т.Ю. Построение и исследование виртуального прототипа мотор-колеса робототехнического транспортного средства // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т.8, №2 (27). С.6-14

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Бушуев Д.А., канд. техн. наук, доцент,

Кузубов А.С., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Аннотация. В данной статье рассматриваются все этапы разработки весоизмерительной системы на основе тензодатчика балочного типа, включающие в себя моделирование упругого элемента, расчет относительной деформации, сборку всех компонентов, отладку и сравнение реальных показателей деформации с полученными при моделировании.

Ключевые слова: весоизмерительная система, тензодатчик, картина напряженно-деформируемого состояния (НДС).

В технологических процессах разных отраслей промышленности, сельском хозяйстве и торговле одно из главных мест занимают дозирование и взвешивание. Во многих автоматизированных производствах огромное значение приобретает учет сырья как при дозировании, так и в процессе отгрузки с помощью весоизмерительных систем. Это вызвано необходимостью соответствия продукции современным требованиям качества, ее рентабельностью, а также созданию непрерывных технологических процессов.

В настоящее время существует несколько способов определения массы того или иного объекта, но наибольшее распространение получили электронные весоизмерительные устройства, основанные на использовании тензодатчиков. Последние представляют собой измерительный преобразователь деформации упругого чувствительного элемента датчика, вызванной воздействием массы измеряемой объекта, в электрический сигнал. Как правило, такие датчики имеют в своей структуре тензорезисторы, нанесенные на упругий элемент и соединенные между собой в мостовую схему [1]. В свою очередь тензорезисторы, деформация которых соответствует деформации упругого элемента датчика, в процессе измерения массы некоторого объекта изменяют свое сопротивление, что приводит к разбалансу мостовой схемы и, как следствие, формированию электрического сигнала на его выходе.

По конструкции упругого элемента выделяют несколько видов тензодатчиков, наиболее распространенными из которых являются

одноточечные датчики, датчики балочного, торсионного и башенного типа, а также S-образные датчики [2].

При разработке лабораторной весоизмерительной системы целесообразнее остановиться на датчиках балочного типа, что позволит более наглядно и доступно отобразить основные процессы, происходящие в процессе измерений.

На первом этапе разработки в качестве чувствительного элемента датчика была выбрана консольная балка равного сопротивления. В теории она является частным случаем балок переменного сечения и имеет во всех сечениях одинаковые механические напряжения. В реальности же приходится уменьшать сечение свободного конца до минимально допустимого значения, при котором будет обеспечена прочность по отношению к касательным напряжениям. Эта необходимость приводит к тому, что балка имеет максимальные и равные механические напряжения только на определенном участке.

Для определения этого участка была создана конечно-элементная модель балки в среде MSC Patran, обладающая такими же физическими свойствами, что и рассматриваемая балка, а также при помощи решателя MSC Nastran SOL 101 в среде Patran построена картина ее напряженно-деформируемого состояния (НДС) (рис. 1). При этом имитирование наличия подвешенного объекта осуществлялось при помощи приложения статического усилия, к свободному концу балки.

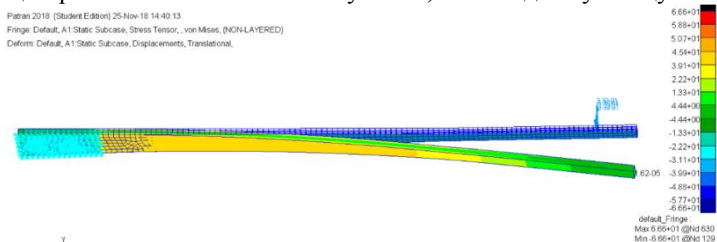


Рисунок 1 - Картина НДС исследуемой балки, полученная в среде MSC Patran с решателем MSC Nastran

Полученная картина НДС показывает, что максимальное одинаковое напряжение и деформация образуются на нижней и верхней поверхностях модели в месте до сужения.

На втором этапе разработки, проанализировав картину НДС, было выяснено, что расположение тензодатчиков будет наиболее оптимальным на верхней и нижней части балки, в зоне между закрепленной частью и до сужения. Это позволит производить измерения с высокой точностью.

Завершающим этапом создания системы измерения являлось соединение между собой тензорезисторов и их дальнейшее подключение к модулю ввода сигнала тензодатчика, например, МВ110-224.4ТД фирмы ОВЕН.

Осуществлять соединение было решено по мостовой схеме, состоящей из четырех тензорезисторов. Данное решение связано с тем, что полученный тензодатчик будет обладать большей чувствительностью, по сравнению, например, с использованием полумостовой схемы (чувствительность у нее ниже в 2 раза). Также, благодаря использованию четырех тензорезисторов, будет обеспечиваться компенсация температурной составляющей, влияющей на точность измерений.

Для дальнейшей работы с весоизмерительной системой, на данный момент состоящий из тензодатчика и модуля ввода, было выполнено подключение последнего к персональному компьютеру с заранее установленной программой «Конфигуратор М110». Осуществляется это путем использования преобразователя интерфейсов АС4, который предназначен для взаимного преобразования сигналов интерфейсов RS-485, имеющегося в наличие модуля ввода, и USB. После была произведена юстировка разработанного датчика в вышеуказанной программе, после чего появилась возможность производить измерение массы объектов, подвешенных на свободном конце балки.

После построения весоизмерительной системы необходимо выполнить сравнительный анализ значений, полученных при моделировании, с реальными показателями.

Для начала произведем расчет выходного напряжения моста:

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{R_2 + \Delta R}{R_2 + R_3} - \frac{R_4 + \Delta R}{R_1 + R_4} \right) \cdot U_{\text{пит}} \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе мостовой схемы, $U_{\text{пит}}$ – напряжение питания моста, R_1, R_4 – сопротивления тензорезисторов, ΔR – изменение сопротивления при деформации тензорезистора.

Так как при построении мостовой схемы подразумевается использование тензодатчиков с одинаковыми характеристиками, то $R_1=R_2=R_3=R_4=R$. В таком случае выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$U_{\text{вых}} = \frac{\Delta R}{R} \cdot U_{\text{пит}}$$

Рассмотрим исследуемую балку как идеальную консольную балку равного сопротивления. Ширина консольной балки изменяется по линейному закону:

$$b_x = \frac{b_0}{L} \cdot x,$$

где b_0 – ширина сечения балки у основания, L – длина балки, x – расстояние между концом балки и исследуемым участком балки.

Момент сопротивления балки изгибу можно представить выражением:

$$W = \frac{b_x \cdot h^2}{6} = \frac{b_x \cdot h^2}{6L} \cdot x,$$

где h – толщина балки.

Напряжение в любом сечении балки определяется как [3]:

$$\sigma = \frac{M_x}{W} = \frac{6F \cdot L}{b_0 \cdot h^2} = const,$$

где F – сила, приложенная к свободному концу балки.

Выражение для определения относительной деформации:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6F \cdot L}{b_0 \cdot h^2 \cdot E}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга).

Как видно из выражения (2), относительная деформация ε зависит только от значения силы F , которая изменяема. Так как сила F зависит от массы груза m , то относительная деформация ε тоже непосредственно зависит от массы груза m . Отсюда следует, что судить о точности измерения массы m можно судить по значениям относительной деформации ε .

Также относительная деформация тензорезистора может быть определена следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \cdot GF}, \quad (3)$$

где GF (Gauge Factor) – коэффициент относительной точечувствительности.

Таким образом, изменяя массу груза m в некотором диапазоне и выполняя соответствующие расчеты относительной деформации по формуле (2) для модели в среде MSC Patran, а по формуле (3) для реальной системы, можно произвести сравнительный анализ теоретической зависимости относительной деформации ε от массы

груза m , полученной при моделировании, $\epsilon_{\text{модел.}}=f(m)$ с полученной экспериментально зависимостью $\epsilon_{\text{изм.}}=f(m)$ (табл. 1).

Таблица 1 - Результаты определения относительной деформации

m , кг	R , Ом	ΔR , Ом	$\epsilon_{\text{изм.}}$, мм/м	$\epsilon_{\text{модел.}}$, мм/м	Приведенная погрешность γ , %
0	261,54	0	0	0	0
1	261,56	0,02	3,82E-05	3,17E-05	1,7
2	261,58	0,04	7,65E-05	6,33E-05	3,5
3	261,59	0,05	9,56E-05	9,52E-05	0,1
4	261,61	0,07	1,34E-04	1,26E-04	2,1
5	261,63	0,09	1,72E-04	1,59E-04	3,4
6	261,64	0,1	1,91E-04	1,86E-04	1,4
7	261,66	0,12	2,29E-04	2,28E-04	0,4
8	261,68	0,14	2,68E-04	2,56E-04	3,1
9	261,69	0,15	2,87E-04	2,85E-04	0,5
10	261,71	0,17	3,25E-04	3,17E-04	2,1

Графики теоретической и реальной зависимостей, построенные по данным из таблицы 1 представлены ниже (рис. 2).

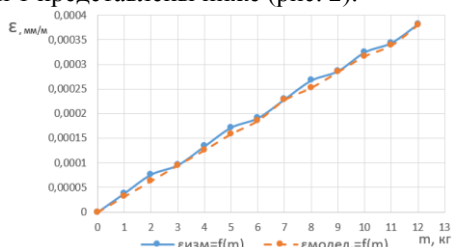


Рисунок 2 - Графики реальной и теоретической зависимостей ϵ от массы m

Как видно, графики реальной и теоретической зависимости расходятся незначительно, и максимальная приведенная погрешность составляет 3,5%, таким образом, полученная компьютерная модель достаточно точно отражает реальные процессы в лабораторной установке и в дальнейшем может быть использована в качестве ее виртуального прототипа [4].

Список литературы:

1. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин, М. Л. 1966.
2. Виды и типы тензодатчиков [Электронный ресурс]. URL: <http://vesovoy.info/tenzodatchiki> (дата обращения: 27.02.2019).
3. Скопинский В.Н., Захаров А.А. Сопротивление материалов: учебное пособие. Часть I. М.: МГИУ. 1999. 128с.
4. Рубанов В.Г. Бушуев Д.А. Методы автоматической балансировки агрегатов с эксплуатационным дисбалансом. Белгород: Изд-во БГТУ. 2017. 150 с.

ПОСТРОЕНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА В САР УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

Бушуев Д.А., канд. техн. наук, доцент,

Огурцов С.Н.,

Решетников В.О.

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос вывода математической модели для резервуара с жидкостью и её проверка при помощи лабораторного стенда.

Ключевые слова: синтез математической модели, верификация, проверка экспериментальных данных, САР уровня.

Каждый специалист из отрасли автоматизации знает, что перед тем, как построить любую систему автоматического регулирования, нужно прежде всего построить её математическую модель, определить устойчивость к различным воздействиям, разработать структурную схему, и только после всего этого можно приступать к сборке системы. Следовательно, сам этап расчёта математической модели объекта и системы в целом представляет собой очень ответственное и важное занятие, так как от точности расчётов, количества упрощений и линеаризаций зависит как точность регулирования системы, так и её устойчивость в целом.

Так, например, грамотно спроектированные современные системы управления уровнем жидкости в баке пользуются большой популярностью в промышленности вследствие необходимости их использования в различных отраслях: нефтеперерабатывающая промышленность, химическая промышленность, строительная промышленность, пищевая промышленность, контроль жидкости в канализациях и сточных водах и др.

Кафедра «Технической Кибернетики» в БГТУ имени Шухова обладает лабораторным стендом для изучения системы автоматического регулирования уровня жидкости в баке, представленной на рисунке 1 [1].

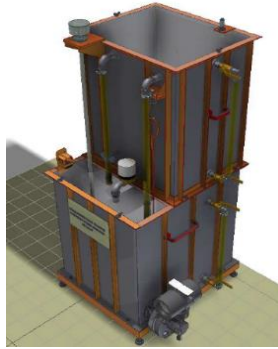


Рисунок 1 - Лабораторный стенд

Данная лабораторная установка состоит из двух баков: верхнего и нижнего, оснащённых датчиками. Верхний бак содержит в себе ультразвуковой датчик уровня, а нижний имеет оптический датчик, гидростатический датчик и поплавковый датчик. Также система оснащена вибрационным насосом «Джилекс 1505» и заслонкой, позволяющей перекачивать жидкость из верхнего бака в нижний.

Эквивалентная схема системы представлена на рисунке 2:

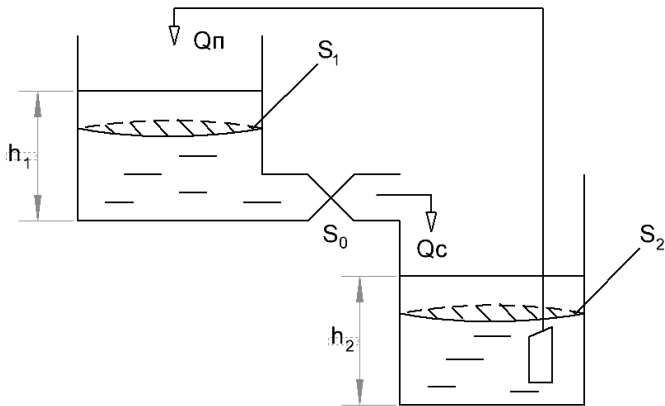


Рисунок 2 - Эквивалентная схема

Рассмотрим математическую модель объекта для верхнего бака. Схема примет вид, представленный на рисунке 3:

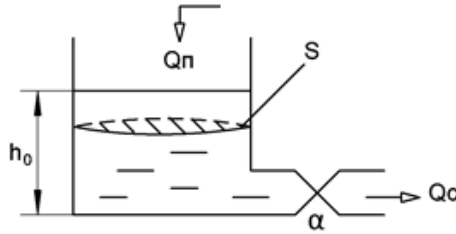


Рисунок 3 - Эквивалентная схема верхнего бака

Предположим, что в течение интервала Δt расходы Q_n и Q_c можно считать постоянными. За это время объём «пришедшей» воды равен $Q_n \cdot \Delta t$, а объём «ушедшей» $Q_c \cdot \Delta t$. Зная площадь сечения бака получим уравнение, связывающее уровень воды с расходами:

$$\Delta h = \frac{(Q_n - Q_c)}{S} \cdot \Delta t$$

Найдём связь между величиной стока и уровнем воды. Воспользуемся уравнением Бернулли:

$$\rho gh = \frac{\rho v^2}{2},$$

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Зная, что расход воды вычисляется как:

$Q_{co} = S_0 \cdot v$, получим:

$Q_{co} = \alpha \sqrt{h}$, где $\alpha = S_0 \sqrt{2g}$ – безразмерная величина

Запишем уравнение в виде

$$\frac{\Delta h(t)}{\Delta t} = \frac{1}{S} Q_n(t) - \frac{\alpha}{S} \sqrt{h(t)}$$

Допустим, что расход увеличился на величину $Q_n = Q_{no} + \Delta Q$, тогда уровень жидкости увеличился $h = h_0 + \Delta h$. Так как это уравнение нелинейно, то необходимо разложить его в ряд Тейлора:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx_0} \Delta x + \frac{d^2 f(x_0)}{2 dx_0^2} \Delta^2 x + \dots$$

$$f(x) = \alpha \sqrt{h_0} \Delta h + \frac{\alpha}{2 \sqrt{h_0}} \Delta h$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{1}{S} (Q_{\text{по}} + \Delta Q_{\text{п}} - \alpha \sqrt{h_0} - \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} \Delta h)$$

Известно, что передаточная функция резервуара с водой представляет собой всегда аperiodическое звено, так как он является статическим объектом, т. е. объектом с самовыравниванием [2], следовательно, рано или поздно всегда наступит уровень жидкости, при котором приток окажется равен стоку. Следовательно, в установившемся режиме $Q_{\text{со}} = Q_{\text{по}}$, и $Q_{\text{со}} = \alpha \sqrt{h}$, мы получим:

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{1}{S} (Q_{\text{по}} + \Delta Q_{\text{п}} - \alpha \sqrt{h_0} - \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} \Delta h)$$

$$\frac{2S\sqrt{h_0}}{\alpha} \cdot \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = \frac{2\sqrt{h_0}}{\alpha} Q_{\text{п}}(t)$$

Множитель $\frac{2S\sqrt{h_0}}{\alpha}$ обозначим как постоянную времени T .

Коэффициент усиления K будет равен $\frac{2\sqrt{h_0}}{\alpha}$. Передаточная функция системы примет вид:

$$W(s) = \frac{\frac{2\sqrt{h_0}}{\alpha}}{\frac{2S\sqrt{h_0}}{\alpha} s + 1} (s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

Допустим, необходимо поддерживать уровень жидкости в верхнем баке на высоте 45 см. Параметры бака: 60 см – высота, 40 см – длина, 50 см – ширина. Диаметр сечения заслонки: 16 мм.

$$S = 0.2 \text{ м}^2$$

$$h_0 = 0.45 \text{ м}$$

$$g = 9.81 \text{ м/с}^2$$

$$S_0 = 0.008^2 \cdot 3,14 = 0,0002 \text{ м}^2$$

$$\alpha = S_0 \sqrt{2g} \approx 0,0002 \cdot 4,4 = 0,00089$$

Так как приток является фиксированной величиной, равной производительности насоса ($Q_{\text{п}} = 0,0003 \text{ м}^3/\text{с}$), коэффициент усиления станет равен:

$$K = \frac{2\sqrt{0,45} \cdot 0,0003}{0,00089} = 0,461$$

Постоянная времени объекта:

$$T = \frac{2\sqrt{0,45 \cdot 0,2}}{0,00089} = 301,4$$

В итоге:

$$W(s) = \frac{0,461}{301,4 s + 1}$$

Промоделируем систему в Matlab Simulink:

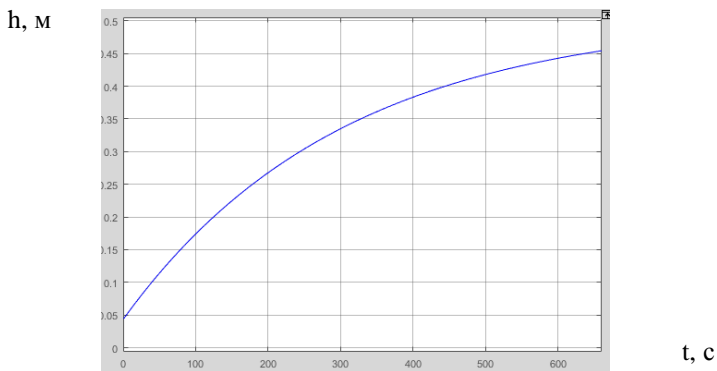


Рисунок 4 - График переходного процесса для верхнего бака

Сравним полученную модель объекта с экспериментальными данными:

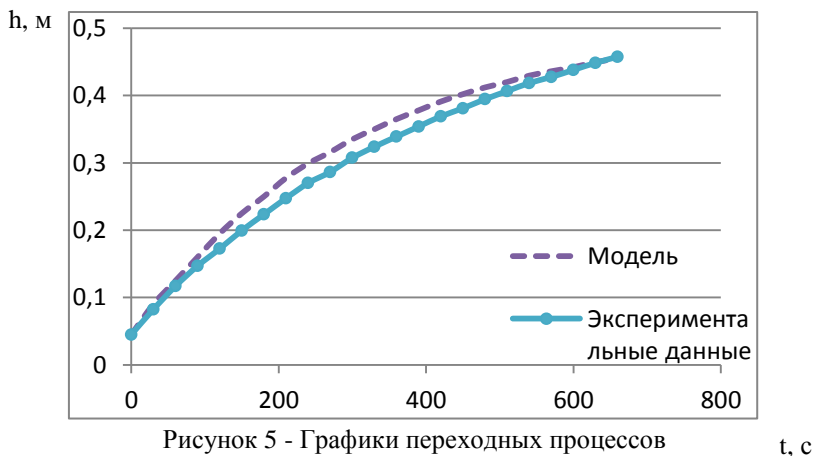


Рисунок 5 - Графики переходных процессов

В данной статье была рассмотрена математическая модель системы автоматического регулирования уровня жидкости в баке, для которой был проведён вывод модели, проведено сравнение с экспериментальными данными, а также проанализирована её актуальность и необходимость применения в различных отраслях промышленности.

Список литературы:

1. Бушуев Д.А., Немыкин Е.В., Кравцов В.В. Разработка лабораторной установки для изучения системы стабилизации уровня жидкости в среде разработки LabView печатн. // Сб. трудов XXV Междун. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-25)». Т.5. Саратов: СГТУ. 2012. С. 164–167.
2. Магергут, В. З., Бажанов А. Г., А. С. Копылов. Регулирование основных технологических величин: лаб. практикум : учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. С. 64.

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ АЭРОФОТОСЪЁМКИ В КОМПЛЕКСЕ С НЕЙРОСЕТЬЮ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Долженко А. В. ст. преподаватель,
Балык В., студент,
Поляков А.И., студент,
Карталов А.В., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г.Шухова*

Аннотация. При получении качественных данных для картограммы поражённых участков как результата мониторинга могут возникнуть такие сложности как труднодоступность, высокая трудозатратность и как следствие долгосрочность и неэкономичность проведения работ. Поэтому проведена разработка проекта о применении мультиспектральной камеры и БПЛА в сельском хозяйстве с последующим применением в камеральной обработке нейронной сети свёрточного типа. Приведена статистика применения обследований с помощью мультиспектральной съёмки. Описана польза от применения нейронной сети в программном комплексе.

Ключевые слова: мультиспектральная съёмка, мониторинг растительности, вегетационный индекс, нейронная сеть.

Введение. В разных странах мира от вредителей и болезней теряется 12–15% урожая, а в некоторых случаях — до 60%. Для разработки рациональной экологически безопасной системы защитных мероприятий и предотвращения недобора урожая очень важен своевременный и качественный мониторинг сельхоз угодий. На ряду с общепринятыми методами, такими как визуальная диагностика, микроскопирование, культуральное исследование, биологический анализ, существуют инновационные методы мониторинга – применение микрофлюидных чипов, анализ молекул-биомаркеров, дистанционное зондирование. Последний метод, о котором и пойдёт речь, в отличии от вышеперечисленных, отличается высокой оперативностью и производительностью, и всё чаще используется в производственных условиях. Суть проекта в ещё большей автоматизации работ, благодаря внедрению в имеющиеся программные комплексы нейросети.[1,8,10]

Мультиспектральная съемка

Мультиспектральная съемка – съемка, в процессе которой формируются одновременно несколько изображений одной и той же территории в различных зонах спектра электромагнитного излучения. Различные комбинации этих изображений позволяют выявить процессы и явления, которые сложно или невозможно определить на снимке в видимом спектре.

Использование мультиспектральной съемки — это новый шаг в развитии сельского хозяйства. Данная технология предоставляет фермерам почти мгновенную максимально детальную информацию о том, что происходит на поле. Мультиспектральные камеры широко применяются фермерскими хозяйствами по всему миру для диагностики изменений показателей растительности с использованием видимого и ближнего инфракрасного спектра. Эти данные позволяют обнаруживать изменения растительности задолго до того, как они проявятся в видимом спектре. В комплексе с нейронной сетью, которая позволяет обрабатывать данные куда быстрее специалистов, процесс мониторинга ускорится в разы.

В мультиспектральной камере каждая линза, количество которых может достигать до 12 (Tetracam Mini-MCA12), регистрирует излучение в узкой области спектра, исключая возможный «шум», что позволяет более качественно интерпретировать данные и проводить измерения.

Дистанционная оценка состояния растительности в последние годы активно стала применяться в практике сельского хозяйства. В сравнении с наземными датчиками съемка с БПЛА предоставляет аналогичные данные о состоянии полей. Мониторинг посевов озимой пшеницы в разные фазы развития в МСХА имени К. А. Тимирязева показали, что с применением аэрофотосъемки достигается воспроизводимая картина пространственного распределения индекса NDVI, в высокой степени совпадающая с результатами наземного сканирования оптическим датчиком GreenSeeker® RT200. По результатам аэрофотосъемки за несколько минут может быть сформирован файл предписания для внесения азотных подкормок по технологии off-line с учетом неоднородности посева.

Кроме этого, были получены аналогичные результаты в университете сельского хозяйства, продовольствия и окружающей среды, г. Пиза, где были проведены опыты по сравнению спектральной отражательной способности, полученные с БПЛА и наземного датчика. По результатам исследований, между показателями, полученных пассивным и активным датчиком, совпадает на 88-97% [1,4].

Преимуществами обследования полей с помощью беспилотной аэрофотосъемки являются высокие оперативность и производительность, достоверность получаемой информации и возможность проводить оценку даже в таких условиях, когда выезд на поле затруднён, а использование совместно с мультиспектральной камерой помогает провести более подробный анализ о состоянии поля. В зависимости от типа БПЛА, за один день можно обследовать от 500 до 5000 га, с высоты от 50 до 500 м.

Анализ мультиспектральной съемки

Данные мультиспектральной съемки позволяют выявить сорную растительность на ранних этапах вегетации.

Исследования на полях кукурузы в Испании, г. Мадрид показали, что мультиспектральные снимки успешно применяются для идентификации сорняков и последующего их зонирования. [7].

Мультиспектральная съемка позволяет провести анализ условий, которые влияют на рост растительности и последующее обследование выбранных участков в поле.

Например, Robert Parker пишет так о применении карт NDVI: «В одной части поля, карта NDVI отражает здоровый зеленый участок, окруженный клочками желтого цвета. Любой агроном, взглянув на данные, может разумно предположить, что эта область содержит здоровый картофель, окруженный менее здоровыми растениями. Однако, используя карту в мобильном приложении, специалист непосредственно исследовал этот участок и нашел там бурно растущие сорняки». Кроме индексов используют различные цветные композиты, которые помогают определить причину какой-либо проблемы.

Анализ мультиспектральных данных помогает определить участки, зараженные болезнями или вредителями, и предотвратить их дальнейшее распространение. Множество исследований доказали успешность применения мультиспектральных камер в этой области. Например, в Канаде провели эксперимент по использованию БПЛА для мониторинга виноградников.

Получив снимки с пространственным разрешением 0,25-0,50 м/пиксель, они провели анализ лоз. Точность определения зараженных растений составила более 90% [2].

В июле 2014 года на испытательных полях (Швейцария) проводились опыты с использованием аэрофотосъемки. На карте NDVI первого полета (17.07.14) отчетливо видны пораженные участки. Выход агронома в поле подтвердил наличие болезни. Дальнейшее распространение можно наблюдать на результатах второго полета

(31.07.16). Кроме этого, хорошо заметны пробелы в обработке фунгицидами [8]. Кроме этого, данные аэрофотосъемки помогают оптимизировать внесение СЗР и работу техники на поле за счет комплексной оценки состояния растительности на основе композитов изображений и рассчитанных вегетационных индексов (рис.9). С помощью мультиспектральной съемки можно определить степень зрелости и, в конечном счете, рассчитать урожайность. Уже давно практикуют применение космических снимков для расчета урожайности. Исследования показали, что разница между прогнозируемыми значениями урожайности и фактическими колеблется от 7,9 до 13,5% (изображения landsat-8, разрешение 30 м) и от 3,8 до 10,2% (изображения Sentinel-2, разрешение 10 м). Снимки с БПЛА, в отличие от спутниковых изображений, имеют более высокое разрешение, соответственно имеют более меньшую погрешность по расчетам урожайности [3].

Применение нейросети в анализе мультиспектральной съёмки

Как же мы хотим применять нейросеть? Существует ряд задач распознавания, где изображение описывается как структурная модель, на элементы которой накладываются определенные связи [9].

Задача классификации эффективно решается с применением аппарата искусственных нейронных сетей [10], при этом важен выбор наиболее подходящей архитектуры сети и метода обучения.

В нашем случае следует использовать сверточную нейронную сеть, нацеленную на эффективное распознавание образов, входящую в состав технологий глубокого обучения. Она использует некоторые особенности зрительной коры, в которой были открыты так называемые простые клетки, реагирующие на прямые линии под разными углами, и сложные клетки, реакция которых связана с активацией определённого набора простых клеток

Сверточная нейронная сеть за счет применения специальной операции – собственно свертки – позволяет одновременно уменьшить количество хранимой в памяти информации, за счет чего лучше справляется с картинками более высокого разрешения, и выделить опорные признаки изображения, такие как ребра, контуры или грани. На следующем уровне обработки из этих ребер и граней можно распознать повторяемые фрагменты текстур, которые дальше могут сложиться в фрагменты изображения.

По сути, каждый слой нейронной сети использует собственное преобразование. Если на первых слоях сеть оперирует такими понятиями как “ребра”, “грани” и т. п., то дальше используются понятия “текстура”, “части объектов”. В результате такой проработки мы можем

правильно классифицировать картинку или выделить на конечном шаге искомый объект на изображении.

Внедрение нейросети в аппаратный комплекс позволит выполнить просмотр отчётов после анализа агрономом, так как после обучения нейросети, она будет способна сама оценить, какие участки поражены, опираясь на данные анализа съёмки, и вывести отчёт.

Заключение. На сегодняшний день применение БПЛА в сельском хозяйстве бурно развивается, и вопрос о совершенствовании данного метода актуален. Современное техническое обеспечение, такое как мультиспектральные камеры, делают беспилотные технологии более информативными, и значительно расширяют их спектр применения, а возможное дополнение в виде нейросети ускорит работу и исключит человеческий фактор. Изучив положительный опыт применения мультиспектральных камер, можно уверенно заявить о том, что даже несмотря на опытно-экспериментальный характер использования, данные технологии развиваются, и с течением времени им необходимо развитие, которое возможно благодаря внедрению новых программных и аппаратных продуктов.

Список литературы:

1. Железова С.В., Ананьев А. А., Вьюнов М.В., Березовский Е. В. Мониторинг посевов озимой пшеницы с применением Вегетационные индексы беспилотной аэрофотосъёмки и оптического датчика GreenSeeker RT200 // Вестник Оренбургского государственного университета. 2016. № 6. С. 56-61
2. Adam Beak Innovative approach to curb vineyard threat wins award // 2016 Режим доступа: <https://blog.bankofthewest.com/blog/2016/02/04/innovative-approach-to-curb-vineyard-threat-wins-award/>
3. Al-Gaadi KA, Hassaballa AA, Tola E, Kayad AG, Madugundu R, Alblewi B, et al. (2016) Prediction of Potato Crop Yield Using Precision Agriculture Techniques. PLoS ONE 11(9): e0162219. doi: 10.1371/journal.pone.0162219
4. Federico Martinelli, Riccardo Scalenghe, Salvatore Davino, Stefano Panno, Giuseppe Scuderi, et al. Advanced methods of plant disease detection. A review. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2015, 35 (1), pp.1-25.
5. Gabriel Torres, Nitrogen recommendations // 2016
6. Визильтер Ю. В. Желтов С. Ю., Бондаренко А.В., Осоков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. - М.: Физматкнига, 2010. - 672 с.
7. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. - 3rd ed. - Prentice Hall, 2009. - 906 p.
8. Шин Е.Р., Щекина А. Ю., Черкасов Р. А. Технология создания топопланов масштаба 1:500 по данным съёмки с квадрокоптера Phantom 4 // Вектор ГеоНаук. 2019. Т.2. №1. С. 54-59

ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ДОСТУПНОСТИ ОБЪЕКТА ИСПОЛЬЗУЯ БПЛА

Долженко А. В. ст. преподаватель,
Карталов А.В., студент,
Балык В., студент,
Поляков А.И. студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г.Шухова*

Аннотация. Проблемы обследования элементов зданий и сооружений, несмотря на стремительно развивающиеся технологии нашего времени, остаются актуальной проблемой. Наш процесс с использованием БПЛА решает данную задачу. Применять его могут как обученные люди, так и не профессионалы, так как он легок в применении.

Ключевые слова: БПЛА, Leica MS50, квадрокоптера Phantom 4, подсчет объемов, Agisoft Photoscan, 3D модель, обследование кровли с воздуха, результат с меньшей погрешностью.

В современное время в геодезии используется достаточно много различного оборудования для измерений. Из них тахеометры, нивелиры, теодолиты, GPS оборудования, лазерные рулетки. Используя их можно выполнять как обыденные, так и сложные строительные, военные, космические задачи. Геодезисты со своими приборами принимали и решали сложнейшие задачи на различных объектах, как Биг Бен, Бурдж Халиф, Тадж Махал, Здание Сиднейской оперы и много других грандиознейших проектов. Но и в наше время есть те условия, те объекты, которые труднодостижимы для человека, обследование является сложной, а иногда и опасной задачей.

Работая в научной деятельности университета, в наши руки попал объект здания аквапарка. Здание находится на стадии строительства, возведен каркас, а также ведется внутренняя отделка. Здание сложной формы как в стенах, так и крыше. Форма здания изображает подобие месяца, изменяя высоту стен по всему периметру. Крыша имеет сложную купольную систему с правой стороны, слева опускаясь. Материал кровли выбран белым цветом для сочетания в архитектурном стиле.

Геодезистам была поставлена задача в подсчете объема кровельного полотна для сверки его с плановым заданием. Для этого

был выбран тахеометр Leica MS50. Данный прибор имеет функцию сканирования с точностью до одного миллиметра, создавая на выходе облако точек. В последствии эти данные можно обрабатывать в различных программах.

Приехав на объект и попробовав различные методы сканирования стало понятно, что определить объем таким образом не получится. Так как лазер прибора отражается от белой поверхности крыши, так же, благодаря сложной купольной форме, нет возможности просканировать многие углубленные участки. В следствии, этого задача заказчика выполнена не была.

Исследуя все возможные варианты получения информации было решено, что необходимо обследование кровли с воздуха. В нашем распоряжении был БПЛА квадрокоптер phantom 4 pro. Характеристика его камеры, время и дальность полета полностью подходили под наши задачи. Для получения объемной модели нужны фотографии с определенным перекрытием друг друга необходимой части здания.

Для создания 3D модели, а так же плана масштаба 1:500, необходимо выполнить следующий ряд работ:

1. Рассчитать параметры полетного задания, в которые входит высота полета БПЛА, скорость полета БПЛА, интервал фотографирования, расстояния между маршрутами.

2. Произвести съемку с БПЛА, по посчитанным параметрам полетного задания.

3. Построить ортофотоплан участка местности в программном продукте Agisoft Photoscan.

4. Создать по полученному ортофотоплану план участка местности в масштабе 1:500 в программном продукте Archicad 22.

Для успешного проведения аэросъемки, которая будет удовлетворять требованиям по точности для создания цифрового плана масштаба 1:500, будет использован БПЛА мультироторного типа DJI Phantom 4, с встроенной камерой. Для расчета параметров полетного задания, будет использован обычный калькулятор или Microsoft office Excel.

Первостепенно нужно определить основные параметры летательного аппарата и фотоаппарата. Большинство информации можно получить из паспортных данных, часть найти в сети интернет, а какие-то придется определить вручную.

Важными полетными характеристиками БПЛА являются: высота полета, скорость движения, полетное время. Среди характеристик

камеры следует отметить тип и размер матрицы, размер пикселя матрицы, фокусное расстояние.

Размер матрицы указан в пикселях 3000x4000 px, однако размер пикселя матрицы не указан в документации. Так как в камере используется матрица Sony Exmor R 1/2.3", можно узнать физический размер матрицы.

После всех расчетов, необходимых для четкого построения ортофотоплана, таблица данных выглядит следующим образом.

Таблица 1 - Вычисленные полетные данные квадрокоптера Phantom 4 pro

Параметры камеры	
Размер матрицы по оси x (px)	3000
Размер матрицы по оси y (px)	4000
Размер матрицы по оси x (мм)	4,68576
Размер матрицы по оси y (мм)	6,24768
Размер диагонали матрицы (мм)	7,8096
Диафрагменное число	2,8
Размер пикселя (мм)	0,00156192
Физическое фокусное расстояние (мм)	3,61
Угол поле зрения по оси x	65,96691849
Угол поле зрения по оси y	81,74121437
Угол поле зрения по диагонали	94,49303752
Требования к съемке	
Размер пикселя на местности (мм)	50
Максимальная высота полета (м)	70,10815748
Масштаб фотографирования	19420,54224
Навигационные параметры	
Длина квадрата (м)	91
Ширина квадрата (м)	121
Требуемое продольное перекрытие (%)	80
Требуемое поперечное перекрытие (%)	60
Продольное перекрытие (м)	72,8
Поперечное перекрытие (м)	72,8
Базис фотографирования (м)	18,2
Расстояние между маршрутами (м)	48,53
Крейсерская скорость БПЛА (км/ч)	15
Крейсерская скорость БПЛА (м/с)	4,17

Продолж. табл. 1

Выдержка (с)	0,002
Величина смаза (мм)	8,333
Интервал фотографирования (с)	4,368

Используя вычисленные данные, строим маршрут полета в программе Litchi выставляя скорость полета, высоту и интервал фотографирования. Для начала запуска необходимо просмотреть полетную территорию на наличие опасных элементов, таких как провода, деревья, антенны. В конце задания мы получим серию фотографий с определенным перекрытием друг друга. Их необходимо загрузить в программу обработки, например Pix4D. В конце мы получим облако точек, импортируемое в любое ПО проектировщика, в нашем случае это будет Leica infinity.

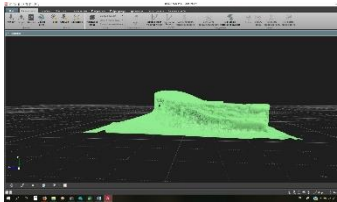


Рисунок 1 - 3D модель сооружения

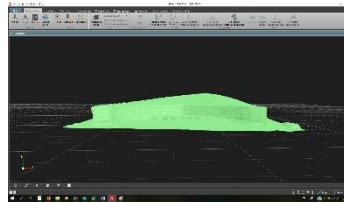


Рисунок 2 - 3D модель сооружения

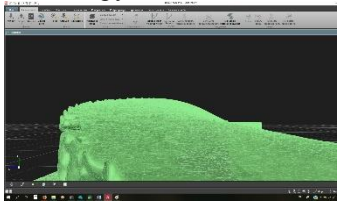


Рисунок 3 - 3D модель сооружения

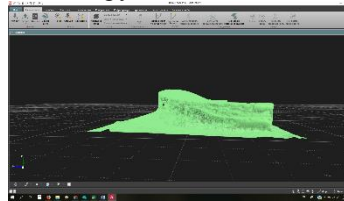


Рисунок 4 - 3D модель сооружения

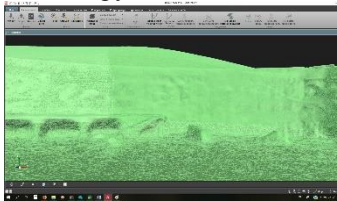


Рисунок 5 - 3D модель сооружения

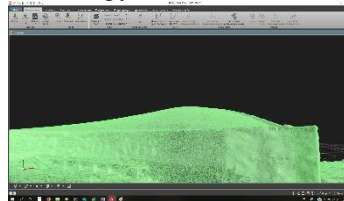


Рисунок 6 - 3D модель сооружения

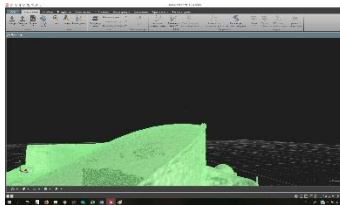


Рисунок 7 - 3D модель сооружения

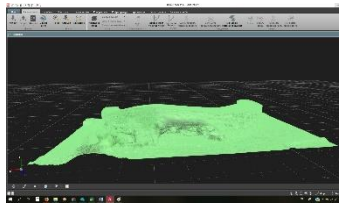


Рисунок 8 - 3D модель сооружения

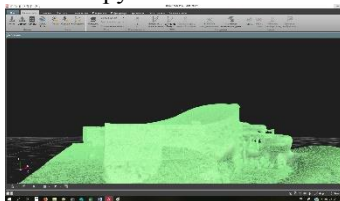


Рисунок 9 - 3D модель сооружения

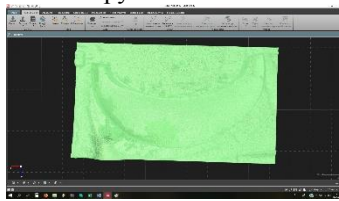


Рисунок 10 - 3D модель сооружения

При попытке просканировать крышу тахеометром LeicaMS50 мы получили достаточно нечеткий результат, так как треть поверхности была не затронута прибором по причине того, что ее не было видно. Площадь, вычисленная при помощи нашего метода используя БПЛА, дала результат с меньшей погрешностью, что полностью удовлетворила заказчика.

Используя полученную модель в ПО, мы можем выполнять ряд задач, например, подсчет объема кровли, при необходимости таким образом можно обнаруживать дефекты строения. Эта технология позволит так же получать различные данные в труднодоступных, обширных местах, например северные территории, горные, недалеко расположенные острова. Затраченное время на получение данных значительно меньше по сравнению со стандартными геодезическими приборами.

На рисунках 1-10 видно форму крыши и наглядно показано, что обследование с земли любыми приборами: тахеометрами, сканером невозможно.

Таким образом, способ, применяемый нами превосходит по времени и точности своих конкурентов. Наглядно показан результат обработки объекта.

Список литературы:

1. Авакян В.В., «Прикладная геодезия: технологии инженерно-геодезических работ». М., «Амалданик», 2012г., 330с.
2. Нефедов В.И. канд. техн. наук, доц., ИНЖЕНЕРНАЯ АЭРОГЕОДЕЗИЯ, Рецензенты: кафедра инженерной геодезии и фотограмметрии Воронежского инженерно-строительного института. ББК 26.12 Ф33, УДК 528.7 (203) (075.8)

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЕТЕКЦИИ ГУСЕНИЦ КАПУСТНОЙ БЕЛЯНКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Долженко А. В. ст. преподаватель,
Поляков А.И., студент,
Балык В., студент,
Карталов А.В., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г.Шухова*

Аннотация. Статья посвящена вопросам развития технологии анализа материалов дистанционного зондирования сельскохозяйственных территорий, в частности особое внимание уделено автоматизации анализа мультиспектральных снимков. Рассмотрены вопросы о использования алгоритмов искусственного интеллекта и методов его обучения применительно к сегментации и классификации элементов полученных мультиспектральных снимков с целью детектирования вредоносного влияния гусениц капустной белянки. На основании существующих решений по применению нейронных сетей, а также современных подходов к их обучению устанавливается, что использование предложенных алгоритмов существенно снизит трудозатраты. Также ускорится процесс анализа материалов дистанционного зондирования. Перечисленные достоинства технологии искусственного интеллекта позволят сократить процент гибнущих растений белокочанной капусты от вредоносного влияния гусениц капустной белянки.

Ключевые слова: мультиспектральная съемка, дистанционное зондирование, капустная белянка, искусственный интеллект, нейронные сети, метод экстремального обучения нейронных сетей.

Несмотря на растущие темпы цифровизации экономики страны и технологизации производств, остаются отрасли, которые заметно отстают. Например, отрасль сельского хозяйства, ввиду своей специфики, долгое время оставалось в числе тех отраслей, в которых применение современных технологий было заторможено и встречалось с определенной долей скепсиса. Но по мере внедрения высоко технологичных комплексов, производство сельскохозяйственной продукции росло и это не могло остаться незамеченным со стороны как ведущих производителей, так и мелких предприятий. Так, например, по данным Федеральной службы государственной статистики, прирост

отгрузки овощей открытого и закрытого грунта за январь-март 2019 года в Белгородской области составил 146,4 % по отношению к аналогичному периоду за 2018 год.

Целью исследования является определение направления разработки автоматизированной среды определения признаков ухудшения состояния посевов культур, относящихся к семейству капустных, от воздействия гусениц бабочки капустницы.

Для осуществления обозначенной цели исследования, поставлен ряд задач, решение которых окажет существенное влияние на итоги исследования:

1. Проведение обзора литературных источников по теме исследования;
2. Изучение существующих методов мониторинга растений, относящихся к семейству капустных;
3. Оценка степени вредоносности гусениц капустной белянки;
4. Определение круга технологических решений, имеющих потенциал для решения освещаемой проблемы.

Рынок белокочанной капусты в России, по объему производимой продукции, является одним из самых обширных рынков овощей. Под посев этой культуры в 2018 году было отведено 115 тыс. гектаров. Основным поставщиком готовой продукции является Центральный федеральный округ, на его долю приходится около одной четвертой рыночного объема.

Одной из причин, оказывающих сдерживающее воздействие на темпы роста урожайности белокочанной капусты, значителен то, что капуста в период вегетации подвергается воздействию вредителей. Одну из самых высоких активностей показывает популяция капустной белянки. Из-за благоприятных климатических условий время лёта бабочек растягивается, что дает им возможность производить заселение растений несколькими поколениями. Во втором поколении может наблюдаться заселение растений до 25,7%.

В настоящее время разработан довольно обширный спектр препаратов и методов борьбы с ними, однако методы определения их присутствия на посевах не изучены в полной мере. Этот факт дает право считать, что применение автоматизированного подхода позволит сократить численность гусениц капустной белянки путем своевременного обнаружения и принятия необходимых мер по их устранению.

Наиболее рациональным подходом к определению этого рода вредителей является использование мультиспектральной аэросъемки

[1], а в совокупности с современной технологией искусственного интеллекта по распознаванию полученных изображений, это даст мощный инструмент, применение которого будет доступно как для крупных агропромышленных комплексов, так и для мелких подсобных хозяйств.

Для мониторинга культурных посевов предлагается использовать мультиспектральные снимки, полученные с помощью мультиспектральной камеры Parrot Sequoia, установленной на беспилотном летательном аппарате (БПЛА) DJI Phantom 4 Pro, допустимо использование другого БПЛА при наличии соответствующих креплений для мультиспектрального сенсора. Мультиспектральный сенсор Parrot Sequoia (Рис.1) выполняет съемку культур в четырех однозначно определенных, видимым и невидимым спектральным полосам, а также сохраняет RGB изображения. Предложенное решение включает в себя два датчика, один из которых датчик освещенности, устанавливаемый на задней части БПЛА. Благодаря информации, передаваемой с датчика освещенности на камеру, происходит корректировка, которая нивелирует влияние разности уровня света. При выполнении обработки этих снимков в специализированном ПО, как результат мы получаем точные спектральные снимки, на которых влияние погодных условий сведено к минимуму.



Рисунок 1 - Мультиспектральный сенсор Parrot Sequoia

При облёте культур на высоте 120 метров Sequoia покажет пространственное разрешение 11 см/пиксель. Использование мультиспектральных камер количество информации, полученной при обработке снимков, значительно увеличивается, что дает выявить качественно новые зависимости [2].

Применение ручного метода дешифрирования полученных снимков занимает большое количество времени, что в определенной степени может повлиять на сохранение растений. Также высоко влияние человеческого фактора на результаты дешифрирования.

Для снижения влияния человеческого фактора и сведения времени обработки к минимуму предлагается использовать алгоритмы нейросетевого обучения при обработке мультиспектральных снимков в совокупности с RGB. Для качественной обработки снимков необходимо осуществить правильную классификацию областей снимка. При классификации снимок или область снимка может рассматриваться как сумма вычисляемых признаков, которые требуется отобразить на множество классов (образов). Существует ряд задач распознавания, где изображение описывается как структурная модель, на элементы которой накладываются определенные связи [3].

Ввиду осуществления съемки на сравнительно большой высоте, выходной снимок представляет собой текстурное изображение.

Текстуры обладают рядом свойств, благодаря которым можно заключить, что предстоит осуществлять обработку именно текстур:

1. Текстура непременно свойство области, у точки текстура не определена. Т. е. определение текстуры включает в себя значения уровней серого в окрестности.

2. Текстура воспринимается в различных уровнях разрешения и масштабах;

3. Область считается текстурной, если число элементарных объектов (примитивов) в области велико. Если их всего несколько, то они воспринимаются как группа исчисляемых объектов. [4]

Текстуру мультиспектрального снимка, как другие текстуры, можно описать двумя главными измерениями. Составляющее текстуру тоновым производным элементам и локальным признакам - первое измерение, и, связанное с пространственным расположением тоновых производных элементов, то есть с пространственным взаимодействием и взаимозависимостью производных элементов – второе измерение.

Тоновыми производными элементами называют область изображения с конкретными тоновыми признаками. Текстура является

пространственным свойством, поэтому измерение её признаков ограничено некоторой областью с относительной однородностью. Такая область может быть охарактеризована площадью и формой. Это свойство текстуры позволяет получить количественную характеристику поражения гусеницей капустницы возделываемой культуры.

Применяются различные подходы к применению и описанию текстуры изображения – структурные, геометрические, статистические.

Структурные модели текстуры предполагают, что текстуры составлены из простых текстурных примитивов согласно некоторому правилу размещения. Этот класс алгоритмов, вообще, ограничен по мощности, за исключением, когда работают с очень регулярными текстурами. [4]

Для обработки полученных мультиспектральных изображений при распознавании и классификации текстур рационально использовать систему признаков, формируемую в результате расчета геометрических моментов признаков формы и бинаризованного энергетического спектра изображения.

Геометрические моменты, как классификационные признаки, имеют перечень достоинств. Признаки инвариантны к масштабу, это свойство дает проводить классификацию при разнообразных размерах используемого фрагмента, а также исходного изображения. Немало важным свойством является инвариантность к повороту фигуры. Также они инвариантны к параллельному переносу. Число признаков легко наращивается без перестройки алгоритма вычисления до достижения устойчивого распознавания. [5]

Существенных результатов в классификации текстурных изображений могут быть достигнуты с применением теории инвариантных моментов, которая основана на процессе поиска инвариантов определяемых по формуле

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (1)$$

где p и q — позиционная разница в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Так в 2009 году были найдены Blur-инварианты, которые не чувствительны к расстройству фокуса камеры, атмосферным явлениям, интерполяции изображения, вибрации используемого сенсора и движению объекта. Эти свойства делают вычисленный инвариант оптимальным при использовании в классификации снимков сельскохозяйственных посевов.

В качестве классифицирующего инструмента в проведении дешифрирования предлагается применять трехслойную нейронную сеть с одним скрытым слоем (SLFN), обучаемую с применением метода экстремального обучения.

Метод экстремального обучения (ELM) дает возможность без итерационной процедуры обучить трехслойную нейронную сеть [7].

Рассматриваемый классификатор, обученный по методу экстремального обучения обеспечивает подходящее качество разбиения областей снимка на классы и высокое быстродействие, что делает его применение перспективным в составе комплекса автоматизированного распознавания гусениц бабочки капустницы, как дополнительное преимущество можно рассматривать возможность работы в режиме реального времени. Это достоинство позволит оперативнее обрабатывать результаты мультиспектральной съемки и принимать меры по уничтожению вредителей.

Таким образом применение беспилотного летательного аппарата оснащенного мультиспектральным сенсором в совокупности со специализированным программным обеспечением на основе классификатора – трехслойной нейронной сети с одним скрытым слоем позволяет в полной мере автоматизировать обследование выращиваемого урожая белокочанной капусты, с целью определения степени её поражения гусеницей капустной белянки. Предлагаемое исследование определяет направление разработки автоматизированной среды определения признаков ухудшения состояния посевов культур, относящихся к семейству капустных, от воздействия гусениц бабочки капустницы.

Список литературы:

1. А. П. Богданов, Р. А. Алешко Разработка методики мониторинга состояния лесов на основе использования данных мультиспектральной космосъемки // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017 г. Том XXVIII № 1. С. 98-110.
2. Курченко Н. Ю. Разработка программного обеспечения для обработки снимков, полученных с беспилотных летательных аппаратов / Н. Ю. Курченко, Я. А. Ильченко, Е. В. Труфляк. – Краснодар : КубГАУ, 2019. – 60 с.
3. Визильтер Ю.В. Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Осоков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. - М.: Физматкнига, 2010. - 672 с.

4. С.Г. Антошук, Н.А. Сербина Система распознавания текстурных изображений при экологическом мониторинге // Искусственный интеллект. 2002 г. №4. С. 406-413.
5. Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1983.
6. J. Flusser, T. Suk, B. Zitova. Moments and moment invariants in pattern recognition. NY.: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
7. G.-B. Huang, et al., Extreme learning machine: Theory and applications. Neurocomputing, vol. 70, pp. 489-501, 2006.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАКЕТОМ СКЛАДСКОГО ПОМЕЩЕНИЯ С ПОРТАЛЬНЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ, ОСНОВАННОЙ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОМ УПРАВЛЕНИИ

**Кариков Е.Б., ст. преподаватель,
Кузнецов Д.С., студент**

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос разработки автоматизированной системы управления макетом складского помещения с порталными манипуляторами основанной на микроконтроллерном управлении.

Ключевые слова: макет складского помещения, микроконтроллерное управление.

Задача повышения эффективности производственных процессов сегодня актуальна для любой компании и, чтобы добиться максимальной отдачи от своей деятельности следует оптимизировать каждый ее этап. Складское хранение товаров либо собственного производства, либо предоставление услуг склада для хранения товаров различного типа с их последующей комплектацией – достаточно сложный технологический процесс, который необходимо и возможно оптимизировать.

Конечно, при необходимости расширения складских площадей можно пойти по наиболее простому пути: построить или арендовать новый склад, однако такое решение часто является самым невыгодным и гораздо разумнее рассмотреть варианты оптимизации и модернизации существующих складских помещения. Безусловно, такая модернизация также может потребовать вложения достаточно значительных средств, вплоть до замены погрузчиков и штабелеров, однако она позволит в большинстве случаев и значительно повысить эффективность работы склада, сократить время погрузочно–разгрузочных работ и ускорить процесс сбора груза [1].

Структура и особенности решений созданной автоматизированной системы управления макетом складского помещения с порталными манипуляторами, основанной на микроконтроллерном управлении.

В состав данного автоматизированного макета входят:

1) кран–штабелер, перемещающийся по направляющей. Он состоит из зубчатой рейки с грузоподъемной платформой, на которой смонтирован поворотный механизм для захвата паллет;

2) кран–балка со специализированным захватом для разборки паллет.

По команде от системы управления на загрузку склада кран–штабелер захватывает паллету и транспортирует ее из зоны формирования паллет в зону хранения, на определенную ячейку и ярус стеллажа.

При поступлении команды на разгрузку склада кран–штабелер забирает необходимую паллету из ячейки стеллажа, адрес которой задается системой управления, транспортирует в зону перегрузки и оставляет ее там. После того, как кран–штабелер уйдет из зоны перегрузки, кран–балка начнет разбор паллеты.

Система управления состоит из персонального компьютера (ПК) и микроконтроллера. Верхний уровень – ПК, его задачи:

- хранение информации о наполняемости склада;
- управление состоянием склада (работа на загрузку/отгрузку);
- выдача управляющих команд на микроконтроллер;
- сбор информации о состоянии того или иного исполнительного механизма.

Нижний уровень – микроконтроллер, его задачи:

- управление двигателями;
- обработка управляющих команд, приходящих с верхнего уровня;
- обработка данных с датчиков;
- обмен данными с ПК.

Управляющая команда формирует задание, которое передается с компьютера на микроконтроллер. В задании содержится информация о манипуляторе, которому требуется выполнить работу по транспортировке условного груза, координаты нахождения данного груза и координаты куда его следует переместить. Микроконтроллер выполняет задание, отправляя управляющие сигналы к подключенным устройствам (датчики расстояния, драйверы двигателя).

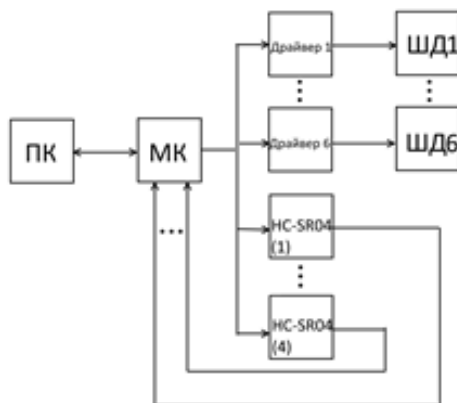


Рисунок 1 - Схема разработанной САУ. ШД – шаговый двигатель, НС–SR04 – ультразвуковой датчик расстояния

Рассмотрим элементы системы управления.

Шаговый двигатель. Шаговый двигатель это синхронный бесщёточный электродвигатель с несколькими обмотками, в котором ток, подаваемый в одну из обмоток статора, вызывает фиксацию ротора. Последовательная активация обмоток двигателя вызывает дискретные угловые перемещения (шаги) ротора [2].

Главное преимущество шаговых приводов – точность. При подаче потенциалов на обмотки шаговый двигатель повернётся строго на определённый угол.

Для работы шагового двигателя можно выбрать один из трех режимов работы:

- Полношаговый режим – ротор поворачивается на 1 шаг за 1 такт.
- Полушаговый режим – ротор поворачивается на $\frac{1}{2}$ шага за 1 такт.
- Микрошаговый режим – ротор поворачивается на $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ и т.д. шагов за 1 такт.

Микроконтроллер. Для реализации системы управления был выбран микроконтроллер STM32F103VET6, лежащий в основе отладочной платы CZ miniSTM32F103V_–ЕК.

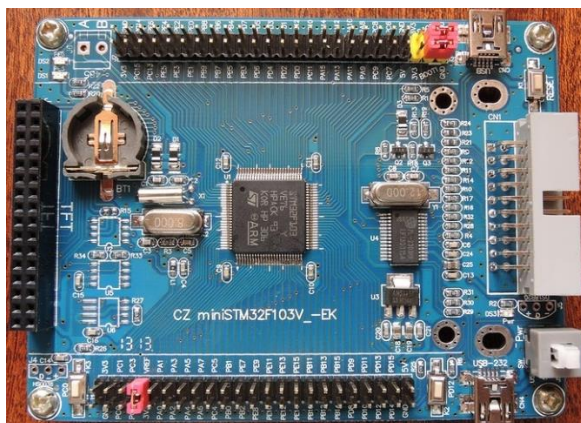


Рисунок 2 - Отладочная плата CZ miniSTM32F103V_EK

Данный МК основан на 32-битном процессоре CortexM3, который способен работать на частоте 72МГц. Имеется высокоскоростная память (Flash-память 512Кбайт и SRAM-память 64Кбайт, а также широкий диапазон усовершенствованных входов/выходов и периферийных устройств. STM32F103VET6 содержит три 12-разрядных АЦП, четыре 16-разрядных таймера общего назначения и два таймера PWM, а также интерфейсы связи: два I2C, три SPI, 2 I2S, пять USART [3].

Драйвер шагового двигателя. Для управления шаговыми двигателями используются драйверы. Подавая управляющие сигналы с МК на драйвер, подается напряжение на соответствующие обмотки двигателя. Изменяя частоту-изменяется скорость вращения ротора двигателя. В зависимости от подачи сигнала изменяется режим работы ШД.

Ультразвуковые датчики расстояния очень востребованы в робототехнических проектах из-за своей относительной простоты, достаточной точности и доступности. Они могут быть использованы как приборы, помогающие объезжать препятствия, получать размеры предметов, моделировать карту помещения и сигнализировать о приближении или удалении объектов. Одним из распространенных вариантов такого устройства является датчик расстояния, в конструкцию которого входит ультразвуковой дальномер HC SR04 [4].



Рисунок 3 - Ультразвуковые датчики расстояния HC SR04

С компьютера на микроконтроллер поступает задание, имеющее следующую структуру: <ID манипулятора><координаты 1-го положения><координаты 2-го положения>. Соответствующие координаты (X и Y) контроллер помещает в заранее созданные очереди (массивы данных). После окончания приема задачи, контроллер обрабатывает полученные данные, вычисляя направление и количество шагов до достижения требуемой координаты. Использование ОСРВ позволяет параллельно выполнять задание для обоих манипуляторов, что безусловно является еще одним преимуществом ее использования [5]. Во время выполнения задачи, МК пересылает координаты текущего положения манипулятора на ПК. Также немаловажно будет отметить использование ультразвуковых датчиков расстояния. Так как в приводе манипуляторов используются шаговые двигатели, одним из недостатков которых является возможность проскальзывания ротора, то для контроля положения манипулятора требуется обратная связь, в качестве которой выступает датчик расстояния. После выполнения всех полученных заданий система переводится в состояние ожидания нового задания, а сам МК запускает режим экономии (используется для экономии энергии, в случае, когда контроллер питается от батарейки).

Разработанная автоматизированная система управления макетом складского помещения с порталными манипуляторами, основанная на микроконтроллерном управлении позволяет осуществить транспортно-складские операции и моделировать работу в различных условиях. Причем благодаря использованию шаговых двигателей совместно с датчиками расстояния, позволяет обеспечить точное позиционирование. МК позволяет работать с множеством операций одновременно (опрос датчиков, выдачу управляющих сигналов на двигатели, обмен информацией с ПК и т.п.). Использование двух порталных

манипуляторов позволяет увеличить скорость выполнения складских работ. Система может быть модернизирована – например, изменение исполнительных устройств манипулятора на вакуумные.

Список литературы:

1. Автоматизация транспортно–складских работ [электронный ресурс] URL: <http://www.automates.ru/storage/> (дата обращения 28.03.2019).
2. Емельянов А.В., Шилин А.Н. Шаговые двигатели: учеб. пособие. М.: РПК «Политехник»; Волгоград, 2005. 48 с.
3. Руководство по использованию микроконтроллера на базе ARM STM32: 2–е издание (v1.8) / Тревор Мартин. Hitex, 2009. 96 с.
4. Амперика [электронный ресурс] URL: hc-sr04-ultrasonic-sensor-distance-module (дата обращения 28.03.2019).
5. Курниц А. FreeRTOS – операционная система для микроконтроллеров // Компоненты и технологии. 2011.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ФОНЕМ НА ОСНОВЕ МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

**Кариков Е.Б., ст. преподаватель,
Родионов А.Ю.**

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность выделения из звукового сигнала мел-кепстральных коэффициентов и их применение для распознавания фонем. Рассматривается применение алгоритма Random Forest для классификации фонем. Рассматривается возможность распознавания фонем в реальном времени.

Ключевые слова: кепстральные коэффициенты, распознавание речи, случайный лес.

На сегодняшний день актуальность задачи выделения кепстральных коэффициентов и классификации фонем растёт вместе с актуальностью задачи распознавания голосовых команд. В данный момент распознавание голосовых команд присутствует в телефонах [1], машинах [2], системах «умный дом» [3]. И область применения этого способа ввода информации продолжает увеличиваться. Именно его преимущества – высокая скорость ввода информации и простота для пользователя – позволяют этому методу ввода с каждым днём расширять область своего применения.

Задачей данной работы являлась разработка приложения, которое осуществляет запись звуков, выделяет из них мел-кепстральные коэффициенты и осуществляет по ним распознавание произнесённых фонем.

Для решения поставленной задачи был выбран язык программирования Python 3 в силу наличия в нём большого количества инструментов для анализа данных. При анализе кепстральных коэффициентов использовались библиотеки pandas, numpy, sklearn. Для работы со звуковым сигналом использовались библиотеки pyaudio, struct, wave.

Для того, чтобы распознать фонему, необходимо для начала определить звуковую единицу, из которой будут выделяться кепстральные коэффициенты, по которым и будет проводиться распознавание. Такой звуковой единицей является фрейм. Причём фреймы идут не друг за другом, а наслаиваясь друг на друга.

Рассмотрим теперь алгоритм получения мел-кепстральных коэффициентов [4].

Мел-частотное представление, показывает значимость различных частот звука для человеческого восприятия. Мел-шкала вычисляется по следующим формулам:

Прямое преобразование:

$$M = 1127 \log \left(1 + \frac{F}{700} \right);$$

Обратное преобразование:

$$F = 700(e^{M/1127} - 1).$$

Для начала произведём преобразование Фурье над полученным фреймом:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, 0 \leq k < N$$

Обработаем сигнал с помощью окна Хэмминга

$$H[k] = 0.54 - 0.46 \cos \left(\frac{2\pi k}{N-1} \right),$$

$$X^*[k] = X[k]H[k], 0 \leq k < N.$$

Далее используем оконную функцию, чтобы рассчитать гребёнку фильтров:

$$H(m) = \begin{cases} 0 & \text{if } k < f[m-1]; \\ \frac{k - f[m-1]}{f[m] - f[m-1]} & \text{if } f[m-1] \leq k < f[m]; \\ \frac{f[m+1] - k}{f[m+1] - f[m]} & \text{if } f[m] \leq k \leq f[m+1]; \\ 0 & \text{if } k > f[m+1], \end{cases}$$

где $f(m)$ равно

$$f(m) = \left(\frac{N}{F} \right) B^{-1} \left(B(f_1) + m \frac{B(f_h) - B(f_1)}{M+1} \right), 0 \leq n < N,$$

где $B(b)$ – частоты, представленные в мел-шкале

$$B^{-1}(b) = 700 \left(\exp \left(\frac{b}{1125} \right) - 1 \right).$$

Рассчитаем гребёнку мел-фильтров, чтобы в дальнейшем представить спектр в формате мел-шкалы. Будем использовать десять мел-фильтров. Тогда, учитывая то, что диапазон частот при восприятии речи человеком составляет от 300 Гц до 8000 Гц, на мел-шкале этот диапазон преобразуется в диапазон от 401.25 до 2834.99. Построим для

данного диапазона 12 опорных точек для построения десяти треугольных мел-фильтров.

$$m[i] = \left[\begin{array}{l} 401.25; 622.50; 843.75; 1065; 1286.25; 1507.5; \\ 1728.74; 1949.99; 2171.24; 2392.49; 2613.74; 2834.99 \end{array} \right],$$

$$h[i] = \left[\begin{array}{l} 300; 517.33; 781.90; 1103.97; 1496.04; 1973.32; \\ 2554.33; 3261.62; 4122.63; 5170.76; 6446.70; 8000 \end{array} \right],$$

$$f[i] = \text{floor} \left(\frac{(\text{frameSize} + 1)h[i]}{\text{sampeRate}} \right).$$

Энергия окон равна

$$S[m] = \ln \left(\sum_{k=0}^{M-1} |X^*[k]|^2 H(m)[k] \right), 0 \leq m < M,$$

и, наконец, получим мел-кепстральные коэффициенты

$$c[n] = \sum_{m=0}^{M-1} S[m] \cos \left(\frac{\pi n(m + 1/2)}{M} \right), 0 \leq n < M.$$

После получения мел-кепстральных коэффициентов можно проводить классификацию фонем. Осуществлять классификацию будем с помощью алгоритма Случайный Лес (англ. Random Forest) [5].

Рассмотрим для начала дерево принятия решений. Пусть дана обучающая выборка, состоящая из матрицы X размерности $n \times m$ и вектора y длиной n . В матрице X строки указывают на номер эксперимента, а столбцы – на измеряемый признак. Вектор y содержит результаты эксперимента. Рассчитаем информационную энтропию вектора y .

$$E = - \sum_{i=1}^c p_i \log(p_i),$$

где c – количество классов, p_i – вероятность того, что данный образец принадлежит i -ому классу.

Будем брать текущее значение $x_{i,j}$ и проходить по всем строкам матрицы X . Если значение элемента строки в j -ом столбце меньше элемента $x_{i,j}$, то добавим соответствующий этой строке элемент вектора y в вектор y_1 , иначе добавим его в y_2 . Теперь найдём энтропии векторов y_1 и y_2 , а также посчитаем информационный прирост.

$$IG = E - (E_1 + E_2).$$

Проделаем вышеописанные действия для всех элементов матрицы X и определим, при каких значениях i и j получается максимальный прирост информации. Сделаем узел дерева, содержащий j -ый признак и

значение, с которым необходимо сравнивать образцы для максимального прироста информации.

Рекурсивно проделывая данную процедуру, мы получим древовидную структуру, в узлах которой указано, по какому признаку на данном этапе производить проверку образца и с каким значением осуществлять сравнение.

Случайный лес представляет собой множество решающих деревьев, обученных на bootstrap-выборках с повторениями. Итоговый результат получается методом голосования. К какому классу текущий образец причислило наибольшее количество деревьев, тот класс и возвращается в качестве ответа.

По описанной выше методике было разработано приложение в среде PyCharm. Также была составлена выборка из наборов мелкепестральных коэффициентов и соответствующих им фонем. Использовались фонемы [o], [ф'] и [п]. Использовались 1178 образцов фонемы [o], 1162 образца фонемы [ф'] и 1134 образца фонемы [п]. Данная выборка была разделена на тренировочную и тестовую. После обучения алгоритма на тренировочных данных, проверка на тестовой выборке показала точность распознавания 83.14%.

Список литературы:

1. Schuster, M. (2010). Speech Recognition for Mobile Devices at Google. Lecture Notes in Computer Science, 8–10.
2. Lockwood, P., Boudy, J., & Blanchet, M. (1992). Non-linear spectral subtraction (NSS) and hidden Markov models for robust speech recognition in car noise environments.
3. Fleury, A., Noury, N., Vacher, M., Glasson, H., & Seri, J.-F. (2008). Sound and speech detection and classification in a Health Smart Home. 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.
4. Molau, S., Pitz, M., Schluter, R., & Ney, H. (n.d.). Computing Mel-frequency cepstral coefficients on the power spectrum. 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221).
5. Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. International Journal of Remote Sensing, 26(1), 217–222.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИВОДА МОТОР-КОЛЕСА РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТЕЛЕЖКИ

**Кариков Е.Б., ст. преподаватель,
Рухубовский А.В.**

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Проведено моделирование в Matlab/Simulink работы привода мотор-колеса, в качестве исполнительного элемента взят бесколлекторный двигатель постоянного тока, показана структура имитационной модели, описаны принципы функционирования.

Ключевые слова: привод, БДПТ, моделирование.

Привод является основным структурным элементом любой технологической машины, его основная задача – приведение в движение исполнительных органов рабочей машины и управление этим движением в целях осуществления технологического процесса. Составными частями системы будут являться: БДПТ с обратной связью в виде датчиков Холла, ШИМ, мостовая схема на транзисторных ключах. Общая схема виртуальной модели привода БДПТ [2] представлена на рисунке 1.

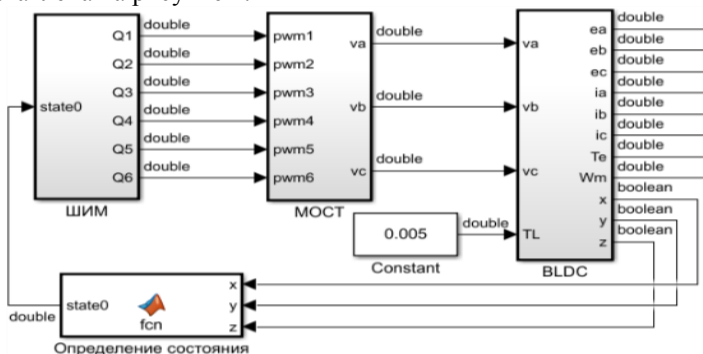


Рисунок 1 - Модель привода БДПТ

Фазные напряжения и токи в обмотках двигателя связаны уравнением $u = e + (L - M) \frac{di}{dt} + Ri$ [3,4,5], где u – фазное напряжение, e – обратный ЭДС, L – самоиндуктивность, M – взаимная индуктивность, i – фазный ток, R – сопротивление обмоток. Динамическая модель двигателя состоит из механической и электрической частей $T_e = \sum_k k_t i_k f_k(\theta_r)$, механическое движение

двигателя $T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m$, скорость и положение ротора имеют следующие соотношения: $\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{p}{2}\omega_m$, где T_e – электрический крутящий момент, T_L – крутящий момент нагрузки, ω_m – скорость вращения ротора, J – момент инерции ротора, B – коэффициент трения, k_t – постоянная момента, p – количество полюсов, θ_r – электрический угол. Объединяя уравнения, получим: $I = \frac{1}{L_s s + R}$ [$v_n - e$], где $L_s = L - M$, применяя преобразования Лапласа $T_e - T_L = (Js + B)\omega_m$. Скорость двигателя $\omega_m = \frac{1}{Js + B}(T_e + T_L)$. На рисунке 2 представлен фрагмент модели БДПТ, осуществляющий преобразование входных напряжений в скорость вращения и момент на валу двигателя. Блок «Обратная ЭДС» (рис. 3) осуществляет расчет обратной ЭДС в зависимости от скорости вращения и положения вала двигателя.

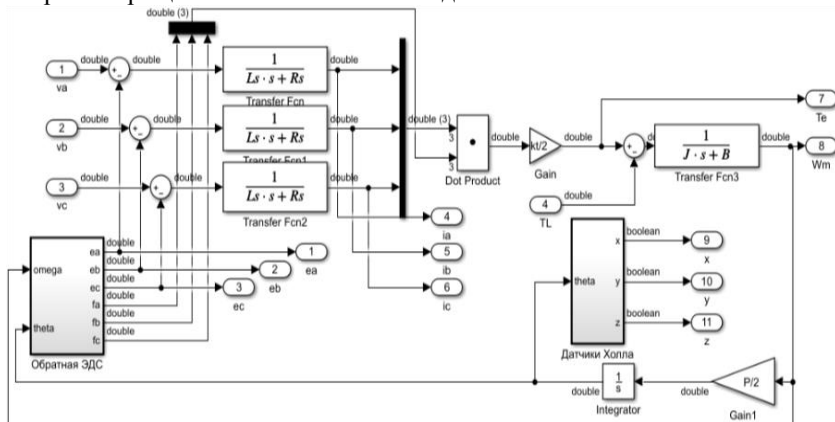


Рисунок 2 - Модель БДПТ

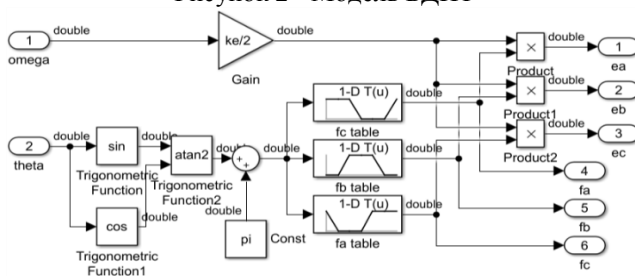


Рисунок 3 - Блок моделирования обратной ЭДС (back-EMF)

Для вращения БДПТ важно знать положение ротора, чтобы производить правильную последовательность подачи питания. Это может быть достигнуто с помощью датчиков Холла, размещенных на статоре БДПТ через каждые 120° . На рисунке 4 представлен фрагмент модели БДПТ, моделирующий работу датчиков Холла.

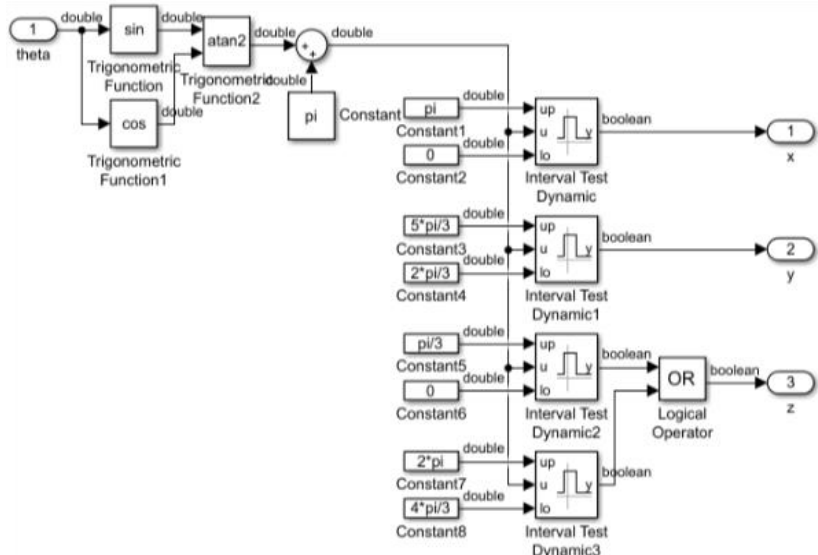


Рисунок 4 - Блок моделирования датчиков Холла

Блок «Определение состояния» представляя собой S-функцию в Matlab интерпретирует входящий сигнал с датчиков Холла в одно из шести состояний. На выходе получаем ступенчатый сигнал (рис. 5).

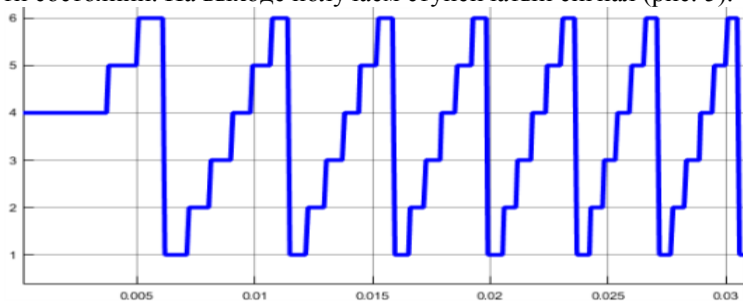


Рисунок 5 - Переключения состояния

Инвертор, в свою очередь, моделирует подачу питания в разные моменты времени на обмотки двигателя. Управление питанием обмоток

двигателя осуществляется с помощью 6 транзисторных ключей, включенных по мостовой схеме (рис. 6).

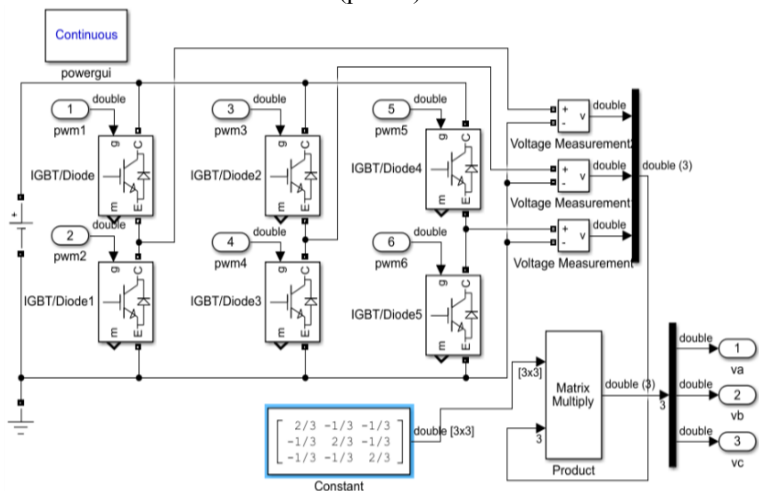


Рисунок 6 - Модель трехфазного инвертора

Для управления вращением двигателя необходимо переключать ключи, что реализовано в блоке «ШИМ» на рисунке 7 [1]. В ШИМ для переключения используется ступенчатый сигнал с блока «Определения состояния». Направление движения регулируется входом dir – если «1» то по часовой, «-1» против часовой.

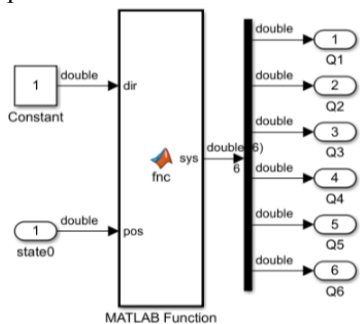


Рисунок 7 - Блок моделирования ШИМ

Полученные результаты моделирования скорости (рис. 8) и крутящего момента (рис. 9) показывают, что предлагаемая имитационная модель отражает особенности работы бесколлекторных

двигателей постоянного тока, и может применяться при решении задач синтеза систем управления БДПТ и анализом их работы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6

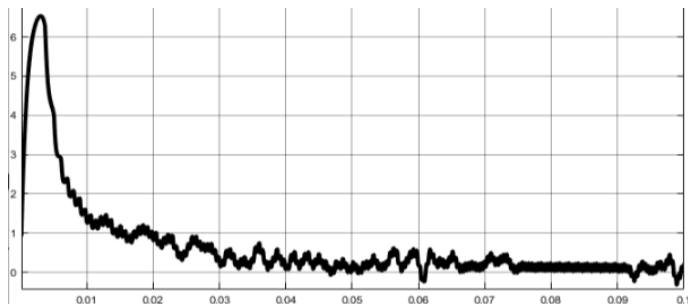


Рисунок 8 - Крутящий момент

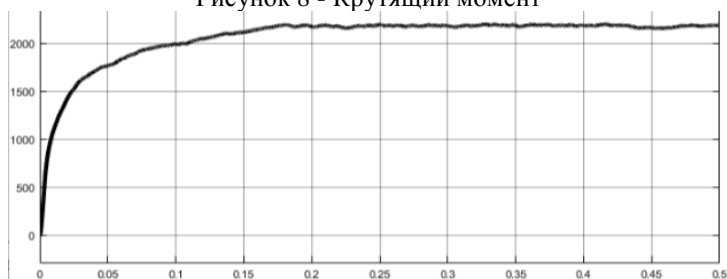


Рисунок 9 - Скорость, об/мин

Список литературы:

1. BLDC Motor Modelling and Control – A Matlab/Simulink // P.10, P.34, P.35, P.40.
2. Chung-Shi Tseng // Model Construction and Verification of a BLDC Motor Using MATLAB/SIMULINK and FPGA Control. P.1798-1800.
3. Mrs.G. Kusuma // Simulation of Brushless DC Motor using Direct Torque Control. P.1565.
4. Arman Jaya, Purwanto Era // Design and Simulation of Sensorless BLDC Motor Drive Using Flux Linkage Increment Based on the Line-to-Line VEMF for Electric Vehicles// P.164
5. Кисельков А.Н. Исследование динамики автоматической системы стабилизации курса транспортной робототележки // Машиноведение. 1988. №2. С.42-47.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА МАНИПУЛЯТОРА «KAWASAKI RS080N» В СРЕДЕ MSC.ADAMS*

Кижук А.С., канд. техн. наук, доцент,

Глушенко А.С., студент,

Гольцов Ю.А., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Рассматриваются вопросы моделирования динамики промышленного робота-манипулятора «Kawasaki RS080N» в среде MSC. Adams. Получена кинематическая схема манипулятора и реализована визуальная модель робота, позволяющая исследовать различные механические и динамические характеристики, имитируя реальные условия работы.

Ключевые слова: робот, манипулятор, MSC. Adams, динамика, моделирование.

В настоящее время робототехнические системы широко используются в современной промышленности, занимая ведущие отраслевые направления. На производственных предприятиях используются множество различных типов роботов, но большую часть из них составляют роботы-манипуляторы. Существует несколько мировых производителей роботов-манипуляторов. Один из них — это фирма «Kawasaki», имеющая широкий модельный ряд роботов-манипуляторов с различным функционалом.

Важной задачей проектирования является моделирование рабочих режимов роботизированных устройств, в частности динамики роботов-манипуляторов. Существует ряд специальных программ, которые позволяют с высокой точностью выполнить моделирование робототехнических устройств [1]. Одной из таких программ является среда MSC. Adams, позволяющая создавать визуальные динамические модели и производить с ними различные исследования [2]. Среда MSC. Adams имеет возможность обмена данными с математическими пакетами, например, Matlab. Создание таких моделей, их интеграция и исследование позволяют оценить работу устройств в различных эксплуатационных условиях и избежать появления нештатных ситуаций на реальном объекте [3].

Для задач моделирования был выбран универсальный робот «Kawasaki RS080N». По грузоподъемности он относится к средним (до 80 кг), имеет 6 степеней свободы и способен выполнять большой спектр

Для проектирования модели робота-манипулятора объемный чертеж загружен в среду MSC. Adams через импортирующее окно (рис. 3) [6, 7]. Чертеж типа STEP можно загрузить с официального сайта фирмы Kawasaki.

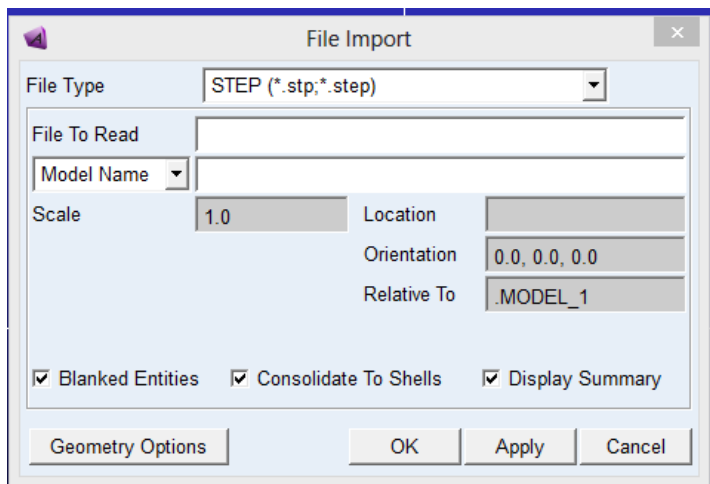


Рисунок 3 - Окно импорта исходного файла

В результате получена визуальная модель робота в среде MSC Adams, представленная на рис.4.

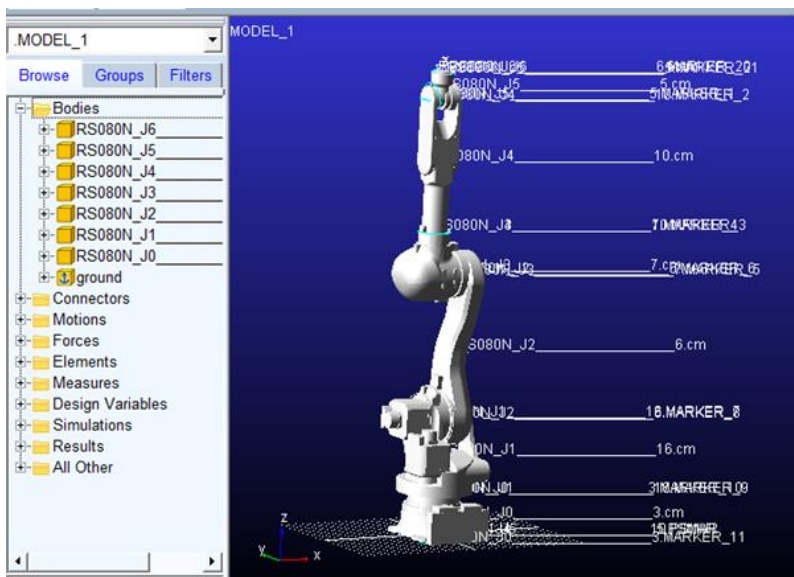


Рисунок 4 - Модель в MSC Adams робота «Kawasaki RS080N»

Исследование механизма в рассматриваемой среде упрощается благодаря таким возможностям как:

- привязка твёрдых тел к точкам и, как следствие, быстрая и удобная параметризация;
- индивидуальное задание момента инерции и материала звеньев для тел;
- добавление сил трения к парам вращательного типа;
- создание различных измерителей (Measure), наглядно показывающих результаты совершаемых действий;
- симуляция работы созданного механизма;
- связь с Matlab.

Таким образом, использование среды MSC Adams позволяет достаточно точно исследовать механическую систему, выбрав реальные элементы на основе значений силовых характеристик, а проведение совместного моделирования обеспечивает возможность исследования динамики работы систем автоматического управления и рассмотрения вопросов их синтеза.

*Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Кижук А.С., Гольцов Ю.А. Анализ технических средств в структуре систем управления и их выбор при проектировании: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 242 с.
2. Шипов Д.Н. Начальные шаги работы с MSC.Adams/View (Обучающее руководство). Москва: Московское представительство MSC.Software Corporation, 2003. 59 с.
3. Коренева Т.Ю., Бушуев Д.А. Разработка и исследование модели манипулятора в среде MSC Adams. Сборник трудов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. [Электронный ресурс].
4. Модель робота Kawasaki RS080N// [Электронный ресурс]. URL: <https://robotics.kawasaki.com/en1/products/robots/small-medium-payloads/RS080N/> (дата обращения: 05.03.2019).
5. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 400 с.
6. Рубанов В.Г., Кижук А.С., Гольцов Ю.А., Кариков Е.Б. Реализация алгоритма аппроксимации дробного интегрирования с оценкой ошибки // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. №2. С.148-151.
7. Воронежский Д.С., Бушуев Д.А. Моделирование движения манипулятора промышленного робота в среде MSC.Adams. Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2017. Т.4. С.110-114.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ*

Кижук А.С., канд. техн. наук, доцент,

Гольцов Ю.А., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г.Шухова*

Аннотация. Изучаются нелинейные явления в энергоэффективной широтно-импульсной системе управления температурным полем нагревательной установки, поведение которой описывается кусочно-гладким дискретным отображением.

Ключевые слова: нагревательная установка, математическая модель, температурное поле, высокая мощность, полевой транзистор, энергоэффективность.

Регулирование температуры является одной из важнейших задач во многих теплотехнологических процессах. Так, например, при выращивании кристалла синтетического сапфира необходимо обеспечить закон изменения температуры в тигле от 25°C до 2050°C с определённой степенью наращивания и спада температуры, что требует применения автоматической системы управления с возможностью программного задания изменения температуры в тигле с заданной точностью. Используемые в настоящее время регуляторы температуры с тиристорными исполнительными устройствами всех типов существенно искажают форму кривой тока, потребляемого из сети, приводя к возникновению в питающей сети несинусоидальных режимов [1].

Устранить отмеченные недостатки и упростить систему регулирования представляется возможным, применив в качестве исполнительных устройств полевые транзисторы.

Авторами спроектирована и реализована система управления нагревателем высокой мощности, построенная на основе высокочастотного силового преобразователя с широтно-импульсным регулированием. Такая система позволяет снизить гармонические искажения в питающей сети, повысить быстродействие и КПД [2]. Известно, что обеспечение требуемого качества управления в системах с импульсной модуляцией является сложной задачей. Это обусловлено тем, что в импульсных системах при вариации параметров возможно возникновение колебаний на пониженных частотах, кратных частоте модуляции, квазипериодических и хаотических режимов.

Большинство импульсных систем автоматического регулирования могут быть описаны одной или несколькими типами систем дифференциальных уравнений, имеющих разрывную правую часть [3-5].

Широтно-импульсная система управления нагревательной установкой [6] описывается следующим уравнением:

$$T_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + T_2 \cdot \frac{dx}{dt} + x = K \cdot \varphi(\varepsilon), \quad (1)$$

где x - переменная, обозначающая текущую температуру в нагревательной установке, $\varphi(\varepsilon) = f - x$

, $\varphi(\varepsilon)$ - функция переключения в зависимости от сигнала ошибки ε , T_1, T_2 - постоянные времени, K - коэффициент передачи системы.

Дальнейшее решение приводит к системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y; \\ T_1 \cdot \frac{dy}{dt} + T_2 \cdot y + x = K \cdot \varphi(\varepsilon); \end{cases}$$

где y обозначает первую производную от x . Преобразовав второе уравнение, получаем:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y; \\ \frac{dy}{dt} = -\frac{T_2}{T_1} \cdot y - \frac{1}{T_1} \cdot x + K \cdot \varphi(\varepsilon); \end{cases} \quad (2)$$

Функция переключения $\varphi(\varepsilon)$ определяется следующим выражением:

$$\varphi(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & k \cdot T < t < k \cdot T + \tau_k; \\ 0, & k \cdot T + \tau_k < t < (k+1) \cdot T; \end{cases} \quad k \in N; \quad (3)$$

Физически при достижении определённого порога ошибки ε , система должна отключить управляющее воздействие.

В форме пространства состояний систему (2) можно записать в следующем виде:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot X + B \cdot \varphi(\varepsilon);$$

$$\frac{dX}{dt} = \begin{cases} A \cdot X + B, & \text{если } \varepsilon > 0 \\ A \cdot X, & \text{если } \varepsilon < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1/T_1 & -T_2/T_1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ K/T_1 \end{bmatrix}$$

где A - матрица состояния, B - матрица

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

управления, X - матрица состояния.

Решение уравнение (4) относительно матрицы состояния с использованием специальных алгоритмов расчета [6–8] дает возможность построить фазовые портреты системы (1) в среде MATLAB и проанализировать ее динамику (рис. 1).

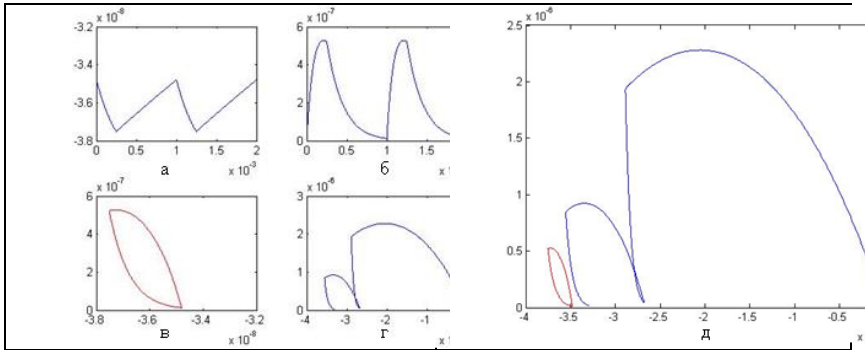


Рисунок 1 - Фазовые портреты системы

На рис. 1 (а, б) представлены переменные состояния x и y матрицы X , рис. 1 (в) иллюстрирует предельный цикл, к которому стремится изображающая точка, рис. 1 (г, д) показывают динамику системы с равными начальными условиями.

Полученные результаты позволяют судить о динамике широтно-импульсных систем с различными начальными условиями и могут быть

использованы для дальнейшего изучения типовых импульсных систем с целью исследования хаотических колебаний [9].

*Работа выполнена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Кижук А.С., Гольцов Ю.А. Микропроцессорная система автоматического управления тепловым режимом технологического процесса выращивания кристалла сапфира // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №11. С.42-49.
2. Пат. № 2612311 Российская Федерация, МПК G05D 23/22. Устройство регулирования температуры электронагрева / Гольцов Ю. А., Жусубалиев Ж. Т., Кижук А. С., Коленченко В. В., Рубанов В. Г., заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г.Шухова. – № 2016113209, заявл. 06.04.2016, опубл. 06.03.2017, Бюл, № 7. 5 с.
3. Айзерман М.А., Гантмахер Ф.Р. Устойчивость по линейному приближению периодического решения системы дифференциальных уравнений с разрывными правыми частями // Прикладная математика и механика. 1957. Т.21(2). С.658-669.
4. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука, 1985. 225 с.
5. Дубровский А.Д. Подход к стабилизации неустойчивых периодических решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Труды ИСАРАН. 2009. Т.44.
6. Баушев В.С., Жусубалиев Ж.Т., Колоколов Ю.В., Терехин И.В. К расчету локальной устойчивости периодических режимов в импульсных системах автоматического регулирования // АиТ. 1992. №6. С.93-100.
7. Жусубалиев Ж.Т., Рубанов В.Г., Гольцов Ю.А., Яночкина О.О. Программа расчета инвариантных многообразий седловых циклов двумерных обратимых кусочно-гладких отображений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661000 от 02.10.2017.
8. Жусубалиев Ж.Т., Рубанов В.Г., Гольцов Ю.А., Яночкина О.О., Поляков С.А. Квазипериодичность в системе управления температурным полем нагревательной установки // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2017. Т.44. №23(272). С.113-122.
9. Di Bernardo M., Budd C.J., Champneys A.R., Kowalczyk P. Piecewise-smooth dynamical systems: Theory and applications. London: Springer-Verlag, 2008. 483p.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НАГРЕВАТЕЛЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ*

Кижук А.С., канд. техн. наук, доцент,

Гольцов Ю.А., студент

Гончаров Н.А., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Представлена математическая модель температурного поля нагревателя высокой мощности с учетом радиационной составляющей в виде системы дифференциальных уравнений. Применение аппроксимации дифференциальных операторов с использованием разностной схемы второго порядка точности позволило получить систему алгебраических уравнений для нахождения значений температуры в различных точках пространства нагревателя методом сеток с заданной погрешностью.

Ключевые слова: математическая модель, нагреватель, высокая мощность, температурное поле, сапфир.

Синтетические монокристаллы сапфира получили широкое применение в микроэлектронике, полупроводниковой промышленности, медицине, атомной промышленности, производстве линз, светодиодов и лазерных элементов в качестве материала с превосходными механическими и оптическими свойствами.

Монокристаллы выращиваются в процессе управляемой кристаллизации, при котором особенно важно точно задавать условия фазовых переходов и отслеживать распределение температур в области вокруг фронта кристаллизации вдоль всей его поверхности – зоны кристаллизации. Самым распространенным методом выращивания является метод Киропулоса [1].

Любая попытка изменения ростового процесса кардинальным образом изменяет тепловые условия выращивания и приводит к необходимости разработки нового технологического процесса или существенного изменения конструкции ростовой установки.

Повышение точности управления температурным режимом приводит к выпуску кристаллов более высокого качества, воспроизводимости результатов ростового цикла.

Процесс теплопереноса описывается системой дифференциальных уравнений, включающей в себя уравнения теплопроводности, граничные условия и начальное распределение температур [2, 3].

Рассмотрим уравнения, необходимые для построения математической модели температурного поля нагревательной установки (рис. 1).

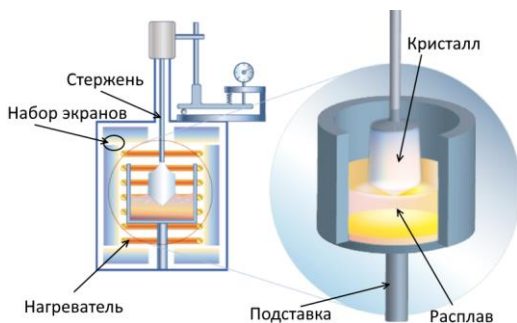


Рисунок 1 - Внутреннее устройство ростовой установки

Уравнение теплопроводности в цилиндрическом объекте [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где r, z, φ – цилиндрические координаты.

На оси цилиндра должны выполняться условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad T|_{r=0} \neq \infty.$$

Устранив возникшую в (1) при $r = 0$ неопределенность $\frac{0}{0}$, получим:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \Big|_{r=0}. \quad (2)$$

Полученное граничное условие (2) задает температуру на оси цилиндра.

При рассмотрении граничных условий далее зададимся одномерным пространством с координатой x . Граничные условия второго рода задают тепловой поток на внешних поверхностях тела:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q(t). \quad (3)$$

Граничные условия третьего рода характеризуют закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой при постоянном потоке тепла:

$$q = k_k(T_c - T_n). \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности k_k состоит из коэффициента теплопроводности жидкой или газообразной среды, с которой происходит теплообмен, и условной толщины пограничного слоя δ .

Граничные условия четвертого рода описывают такой тепловой контакт поверхности тела с окружающей средой или с другим телом, когда температуры и тепловые потоки соприкасающихся поверхностей одинаковы:

$$\begin{aligned} T_n(t) &= T_c(t), \\ -\lambda \frac{\partial T_n}{\partial x} &= -\lambda \frac{\partial T_c}{\partial x}. \end{aligned} \quad (5)$$

Излучение на границе представляется в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \delta k_{\text{и}}(T_c^4 - T_n^4), \quad (6)$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрической формы и свойств поверхности тела, δ – постоянная Стефана-Больцмана.

Итоговая система уравнений составляется из приведенных выше уравнений с учетом конструкции теплового объекта, после чего необходимо перейти к их дискретной форме, так как для нахождения значений температуры в разных точках пространства нагревателя будет применяться метод сеток [5].

Для перехода от системы дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений необходимо выбрать разностную аппроксимацию дифференциального оператора. Возникает задача поиска оптимального метода, который позволял бы найти решение с заданной точностью за минимальное машинное время, поскольку каждому уравнению поставить в соответствие бесконечное множество разностных аппроксимаций, имеющих один и тот же порядок точности и сходный объем вычислений.

Зададимся параболическим дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F\left(u, x, t, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right). \quad (7)$$

Выберем равномерную сетку по времени с шагом τ и по координате с шагом h (всего шагов по координате N):

$$u(n\tau, ih) = u_i^n,$$

где i — номер шага по координате N , n — номер шага по времени.

Возьмем линейную комбинацию схем значений правой части с текущего и следующего шага по времени с коэффициентом σ :

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\tau} = \sigma F^{n+1} \left(u, x, t, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + (1 - \sigma) F^n \left(u, x, t, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right). \quad (8)$$

Аппроксимируем первую и вторую производную по координате:

$$u_x = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2h}; \quad (9)$$

$$u_{xx} = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{h^2}. \quad (10)$$

Дискретизация по времени разностной схемой (8) со значением $1 \geq \sigma \geq \frac{1}{2}$ при дискретизации производных по координате схемами (9) и (10) является абсолютно устойчивой и имеет второй порядок точности [5].

Для примера возьмем простейшее параболическое уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

где α — коэффициент, не являющийся функцией времени и координаты.

Перейдя к конечным разностям, получим:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\tau} = \frac{\alpha}{2} \left[\frac{u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}}{h^2} + \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{h^2} \right], \quad (11)$$

$$-ru_{i+1}^{n+1} + (1 + 2r)u_i^{n+1} - ru_{i-1}^{n+1} = ru_{i+1}^n + (1 - 2r)u_i^n + ru_{i-1}^n, \quad (12)$$

где

$$r = \frac{\alpha\tau}{2h^2}.$$

Выражение (11) является линейной системой и в общем виде записывается как:

$$a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} = d_i, \quad (13)$$

где для $i \in [2; N - 1]$, $a_i = r$, $b_i = (1 + 2r)$, $c_i = -r$,

$$d_i = ru_{i+1}^n + (1 - 2r)u_i^n + ru_{i-1}^n. \quad (14)$$

Повторяя последовательность действий (11)–(14) можно привести каждое из уравнений (1)–(5) к виду (13). Исключением является уравнение (6), правая часть которого нелинейно зависит от температуры, поэтому такое уравнение сводится к следующему виду:

$$a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + k((u_{i+1}^{n+1})^4 - (u_i^{n+1})^4) = d_i, \quad (15)$$

$$b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} + k((u_{i-1}^{n+1})^4 - (u_i^{n+1})^4) = d_i. \quad (16)$$

Алгебраические уравнения (15) и (16) описывают аппроксимацию уравнения (6) для правой и левой границы соответственно.

Итоговая система алгебраических уравнений записывается в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 u_1^{n+1} + c_1 u_2^{n+1} = d_1 \\ a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} = d_i \\ \dots \\ a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} = d_i \\ a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + k((u_{i+1}^{n+1})^4 - (u_i^{n+1})^4) = d_i \\ b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} + k((u_{i-1}^{n+1})^4 - (u_i^{n+1})^4) = d_i \\ a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} = d_i \\ \dots \\ a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} = d_i \\ a_N u_N^{n+1} + b_N u_N^{n+1} = d_N \end{array} \right. \quad (17)$$

Наличие в системе (17) нелинейных уравнений (15)–(16) делает невозможным применение обычных методов решения для тридиагональных систем. Для вычисления требуется получение алгоритма решения, который позволит находить значения температур в узлах сетки с заданной погрешностью за $O(N)$ действий.

*Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Жмакин А.И. Моделирование роста монокристаллов: тепломассообмен [Электронный ресурс] URL: <https://arxiv.org/pdf/1511.07161.pdf> (дата обращения: 26.02.2019)
2. Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г. Управление температурным полем нагревательной установки в форме модели дробного порядка // СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. №2. С.38-43.
3. Gol'tsov Yu.A., Kizhuk A.S., Rubanov V.G. Nonlinear phenomena in a high-power heating unit with pulse modulated control. MATEC Web of Conferences (Int. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017)). 2017. №129. (03031).
4. Берковский Б.М., Ноготов Е. Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск: «Наука и техника», 1976. 144 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ НА БАЗЕ ПЛК SEGNETICS SMH 2G*

Кижук А.С., канд. техн. наук, доцент,

Гольцов Ю.А., студент,

Куклик В.С., студент,

Набоков А.В., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Разработано устройство управления температурным режимом нагревательной установки в форме модели дробного порядка. Предложено схемное решение структуры управления в SCADA - системе на базе контроллера Segnetics SMH 2G, позволяющее реализовать различные алгоритмы регулирования температуры с высокой точностью.

Ключевые слова: Нагревательная установка, дробный порядок, тепловой объект, теплопроводность, закон управления, промышленный контроллер.

В настоящее время широкое развитие получили системы управления, построенные на промышленных логических контроллерах (ПЛК). Использование цифровых ПЛК позволяет строить распределенные структуры управления, что делает возможным автоматизировать предприятия на их основе. При этом задача регулирования температуры с высокой точностью остается актуальной [1].

Предложена программная реализация дробного алгоритма управления нагревательным устройством, осуществляющая нагрев и охлаждение с заданными параметрами за счет широтно-импульсного регулирования подаваемой на нагреватель мощности [2].

Для реализации алгоритма регулирования температуры использован промышленный контроллер Segnetics SMH 2G со средой программирования «SMLogix» [3-5]. Панель контроллера SMH 2G используется как внешний пульт нагревательной установкой для настроек управления скоростью нагрева, уставки температуры и времени. На экране контроллера оператор может в различных режимах наблюдать текущее изменение температуры (рис. 1).

Математический аппарат представления производных дробного порядка является точным математическим инструментом при решении

задач моделирования нагревательных объектов [6, 7]. Устройства управления и законы управления дробного порядка могут быть реализованы алгоритмическим путем на базе вычислительных комплексов [8].

Поскольку на ПЛК SMH 2G не представляется возможным реализовать дробный алгоритм регулирования температуры, то возникает необходимость использования внешнего вычислителя для реализации дробного закона управления в пакете Simulink Matlab с использованием библиотеки «FOMCON» [9, 10].

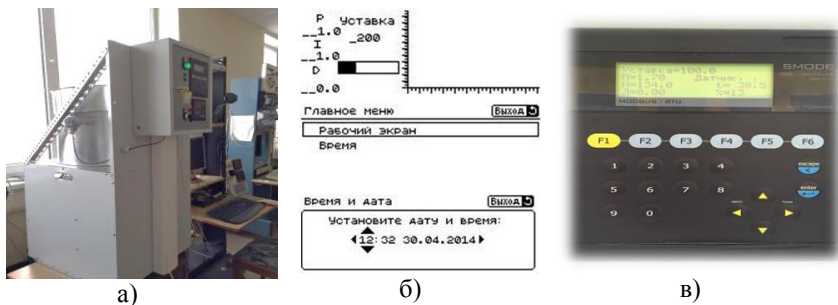


Рисунок 1 - Нагревательная установка (а), экранные формы (б), панель оператора (в)

Предложено техническое решение для связи персонального компьютера (ПК) и программируемого логического контроллера Segnetics SMH 2G. Передача данных осуществляется по протоколу Modbus посредством конвертора RS232-RS485. В операционной системе на ПК настроена программа «Lectus Modbus OPC/DDE сервер», в которую загружается карта переменных из системы программирования SMLogix. Считывание данных с сервера Lectus осуществляется при поддержке встроенной библиотеки OPC Toolbox. Такая реализация позволяет в реальном времени производить считывание, обсчет и запись значения дробного интеграла. Недостатком является отставание на один тик (в нашем случае 0.5 секунды) при записи текущего значения интегральной составляющей дробного регулятора, кроме того, в случае обрыва связи контроллера и ПК, система регулирования прекращает пересчет интегральной составляющей. Для решения второй проблемы, возникающей в случае неполадок, предусмотрен переход к целочисленному регулятору.

Вопрос связанный с отставанием, по сути является несущественным, т.к. объект обладает существенно большей постоянной времени, а период работы ШИМ – регулятора составляет 10 секунд [11]. Кроме того, при необходимости, существует возможность уменьшения тика системы. Схемное решение реализации структуры управления нагревательной установкой в SCADA - системе на базе контроллера Segnetics SMH 2G представлено на рис.2.

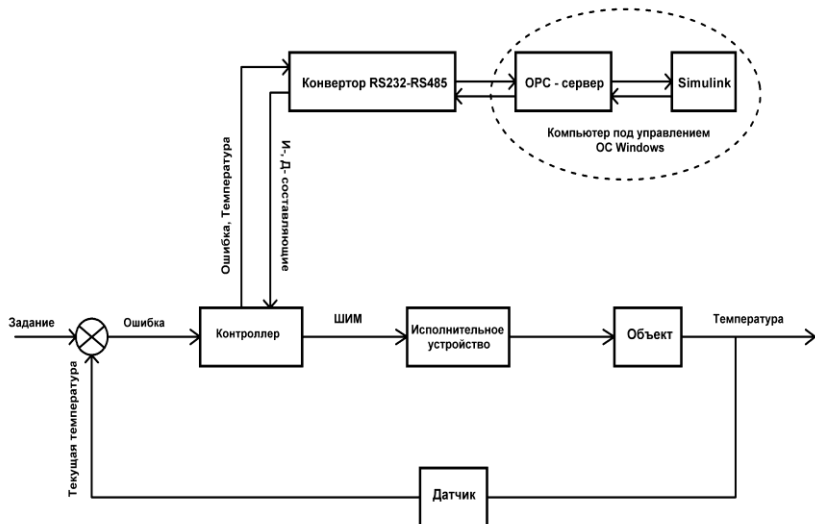


Рисунок 2 - Реализации структуры управления нагревательной установкой в SCADA - системе на базе контроллера Segnetics SMH 2G

В результате моделирования разработаны специализированные функциональные блоки реализации алгоритмов управления в среде Simulink, а также даны рекомендации по настройке регуляторов управления, которые актуальны для решения задач подобного плана.

Рассмотренные приёмы построения и исследования алгоритмов управления динамических систем с передаточными функциями дробного порядка, методики проектирования и моделирования алгоритмов управления динамических систем с передаточными функциями дробного порядка могут быть использованы не только при построении систем, связанных с тепловыми объектами, но и для решения более широкого круга задач, связанных с автоматизацией технологических объектов в других направлениях.

* Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М: Высшая школа, 1967. 600 с.
2. Кижук А.С., Гольцов Ю.А. Микропроцессорная система автоматического управления тепловым режимом технологического процесса выращивания кристалла сапфира // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №11. С.42-49.
3. Программируемый логический контроллер SMH 2G. Руководство по эксплуатации. СПб.: Сегнетикс, 2013. 103 с.
4. Система программирования SMLogix. Техническая документация. СПб.: Сегнетикс, 2016. 30 с.
5. «Сегнетикс» контроллеры для систем автоматизации [Электронный ресурс]. URL: http://segnetics.com/smh_2010/ (дата обращения: 05.03.2019).
6. Fractional-order Modeling and Control. [Электронный ресурс]. URL: <http://fomcon.net/> (дата обращения: 05.03.2019).
7. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.
8. Concerpcion A.M., Chen Y.Q., Vinagre B.M., Xue D., Feliu V.: Fractional Order Systems and Controls: Fundamentals and Applications. Series: Advances in Industrial Control. Springer, Berlin, 2010. 430 с.
9. Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г. Нелинейные явления в широтно-импульсной системе управления теплотехническим объектом // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. №9 С.188-192
10. Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В. Г. Управление температурным полем нагревательной установки в форме модели дробного порядка // СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. №2. С.38-43.
11. Пат. № 2612311 Российская Федерация, МПК G05D 23/22. Устройство регулирования температуры электронагрева / Гольцов Ю.А., Жусубалиев Ж.Т., Кижук А.С., Коленченко В.В., Рубанов В.Г., заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г.Шухова. – № 2016113209, заявл. 06.04.2016, опубл. 06.03.2017, Бюл, № 7. 5 с.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Крюков А.В., ст. преподаватель,
Хрипунов М.В.

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г.Шухова*

Аннотация. В данной статье рассмотрены различные подходы к решению задачи идентификации. Проанализированы существующие методы, позволяющие идентифицировать параметры объекта управления. Выявлена и обоснована важность решения задачи идентификации для теории управления. На основе проведённого исследования было написано программное средство, позволяющее решить задачу идентификации с помощью различных методов.

Ключевые слова: идентификация, метод квадратур, идентификация колебательного звена, программное средство.

Задача идентификации состоит в определении оператора модели, преобразующего входные эффекты объекта в выходные значения [1, 2, 3]. При этом идентификация является обязательным элементом и наиболее сложной стадией поиска решений актуальных практических задач. Именно в процессе реальной идентификации создаются все описания реальности, необходимые в качестве исходных данных для эффективного практического применения математических методов и сложных наукоемких технологий.

Ввиду этого разработка методов и алгоритмов идентификации приобретает сейчас исключительно важное значение для фундаментальной науки. Развитие теории идентификации в классическом направлении сейчас так же актуально и практически значимо, как и в 1950-е гг., когда она зарождалась под влиянием насущных проблем практики. Постоянная необходимость в оптимизации процесса решения практических проблем путем рациональной идентификации стимулирует прогресс теории в классическом направлении. Поэтому по-прежнему актуальны для фундаментальной науки такие области исследования, как математические методы параметрической или непараметрической идентификации, математическая теория структурной идентификации, математическое моделирование систем.

Среди современных отечественных учебных изданий, рассматривающих практически все аспекты курса дисциплины «Идентификация и диагностика систем», можно выделить учебник по теории автоматического управления издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана [4], а также работы коллектива авторов из Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»: главу в монографии [5] и учебное пособие [6].

Существует достаточно большой перечень методов идентификации как для нелинейных систем, так и для линейных, как для детерминированных, так и для стохастических и т.д. В данной работе представлены методы параметрической идентификации, такие как: метод квадратур и геометрический метод.

В рассматриваемой работе ставится задача создания программного средства, предназначенного для определения параметров объекта управления по отдельным методам. Первый из них – это метод квадратур, в котором входными параметрами являются детерминированные входные $x(t)$ и выходные $y(t)$ сигналы, а выходной величиной является импульсная переходная функция $w(t)$. Метод основан на уравнении свёртки:

$$y(t) = \int_0^t \omega(\tau)x(t-\tau)d\tau + y_n(t) + y_c(t).$$

Следующим шагом является представление данного уравнения в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \mathbf{M} \\ y_n \end{pmatrix} = \Delta \cdot \begin{pmatrix} x_1 & 0 & L & 0 \\ x_2 & x_1 & L & 0 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ x_n & x_{n-1} & L & x_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \mathbf{M} \\ \omega_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \mathbf{M} \\ \delta_n \end{pmatrix}.$$

Если предположить, что квадратурная формула достаточно точно аппроксимирует интеграл свертки, в таком случае:

$$\delta_1 = 0, \delta_2 = 0, \mathbf{K}, \delta_n = 0.$$

Решая полученное уравнение, получим формальное решение задачи идентификации, т.е. решение задачи идентификации в идеальных условиях:

$$W = \frac{1}{\Delta} \cdot Y \cdot X^{-1}.$$

Следующий метод предназначен для идентификации колебательной системы по графику её импульсной переходной функции. Задача идентификации сводится к нахождению неизвестных K , ξ и T .

Для определения коэффициента демпфирования ξ пользуются следующим соотношением:

$$\xi = \frac{\ln R}{\sqrt{\pi^2 + (\ln R)^2}},$$

где $R = \frac{A^+}{A^-}$, A^+ и A^- – площади, ограниченные импульсной переходной характеристикой, что видно на рис. 1.

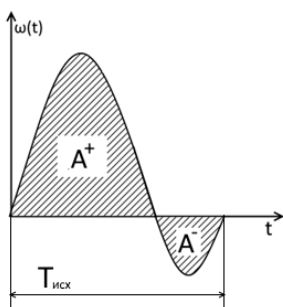


Рисунок 1 - Импульсная переходная функция колебательной системы

$$T = \frac{\sqrt{1 + \xi^2}}{\omega_{исх}}, \text{ а } \omega_{исх} = \frac{2\pi}{T_{исх}},$$

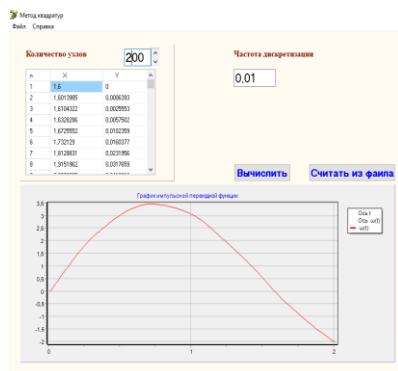
где $T_{исх}$ – период одного колебания.

После того, как ξ и T определены, K можно найти из уравнения, задавшись значениями импульсной переходной функции.

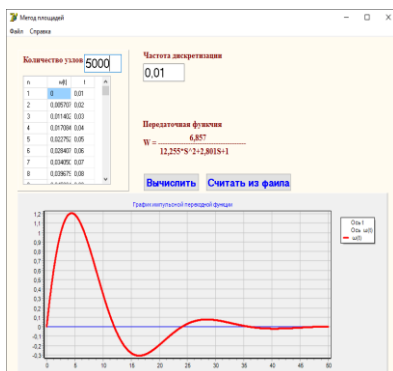
$$w(t) = \frac{K}{\omega\sqrt{1 + \xi^2}} e^{-\xi\omega t} \sin \omega t \sqrt{1 + \xi^2}.$$

Рассмотрим программное средство для параметрической идентификации методом квадратур. В появившемся окне (рис. 2а) пользователь должен ввести количество точек для идентификации и частоту дискретизации сигнала. Далее для считывания данных пользователь должен нажать кнопку «Считать из файла». Данные будут

считаны из файла input.txt и output.txt и помещены в соответствующие ячейки таблицы. Теперь, при надобности пользователь может изменить или дополнить данные в таблице. После чего, при нажатии на кнопку «Вычислить», программным средством будет проведена идентификация и выведен график импульсной переходной функции идентифицируемого объекта.



а)



б)

Рисунок 2 - Программное средство для идентификации
а) методом квадратур б) геометрическим методом

Рассмотрим программное средство для идентификации колебательной системы 2-го порядка по графику её импульсной переходной функции. В появившемся окне (рис. 2б) пользователь должен ввести количество точек для идентификации и частоту дискретизации импульсной переходной функции. Затем, при нажатии на кнопку «Считать из файла», программным средством будут считаны данные из файла impulse.txt, расположенного в папке с программой, и помещены в соответствующие ячейки таблицы. Вместе с этим по этим данным будет выведен график импульсной переходной функции на координатной области.

Активное развитие теории автоматического управления и повсеместная автоматизация производства в последние десятилетия дают гарантию того, что работа в этом направлении не потеряет своей актуальности, поскольку процедура идентификации является неотъемлемой частью теории автоматического управления и

предоставляет большие возможности в создании саморегулирующихся систем автоматического управления.

Список литературы:

1. Райбман Н.С. Что такое идентификация? – М.: Наука, 1970. – 118 с.
2. Цыпкин ЯЗ. Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
3. Штейнберг Ш.Е. Идентификация в системах управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 80 с.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 646с.
5. Теория управления Алексеев А. А., Имаев Д.Х., Кузьмин Н.Н., Яковлев В.Б. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 1999. – 435 с.
6. Идентификация и диагностика систем: учеб. для студ. высш. учеб. заведений/ А.А. Алексеев. Ю.А. Кораблев, М.Ю. Шестопапов. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 352 с.

УПРАВЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЦЕЛЕВОГО ПРОДУКТА В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОГО РОБАСТНОГО АЛГОРИТМА

Невиницын В.Ю., канд. техн. наук, доцент,
Лабутин А.Н., д-р техн. наук, профессор,
Волкова Г.В., канд. техн. наук, доцент,
Корсакова Н.Э., студент

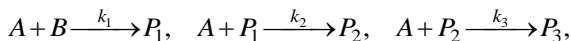
Ивановский государственный химико-технологический университет

Аннотация. В работе решается задача аналитического синтеза системы автоматического управления концентрацией целевого компонента в химическом реакторе, которая обеспечивает инвариантность, ковариантность с задающими воздействиями, асимптотическую устойчивость и робастность при действии неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений. Предложен астатический закон управления концентрацией, полученный с использованием синергетической теории управления.

Ключевые слова: химический реактор, робастная система управления, синергетическая теория управления, аналитический синтез регуляторов, компьютерное моделирование.

Одним из главных требований к системе управления химическим реактором является требование робастности (грубости), т.е. способность сохранять работоспособность в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений. В настоящий момент существует ряд различных подходов к синтезу робастных систем, среди которых основными являются: системы адаптивного управления с подстройкой параметров, системы с применением прогнозирующих моделей, регуляторы состояния, робастные системы с использованием ПИД-регуляторов, нечеткие системы управления, нейронные сети. Тем не менее, указанные методы синтеза систем управления неэффективны для существенно нелинейных объектов [1]. На наш взгляд, перспективным в этом плане представляется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), позволяющий конструировать робастные системы управления [2].

Рассмотрим емкостной жидкофазный реактор непрерывного действия, работающий в политропическом режиме (рис. 1). В аппарате протекает сложная последовательно-параллельная экзотермическая реакция вида:



где A, B – исходные вещества; P_1, P_2, P_3 – продукты реакции; k_1, k_2, k_3 – константы скоростей стадий. Целью функционирования химического реактора является получение целевого компонента P_2 заданной концентрации.

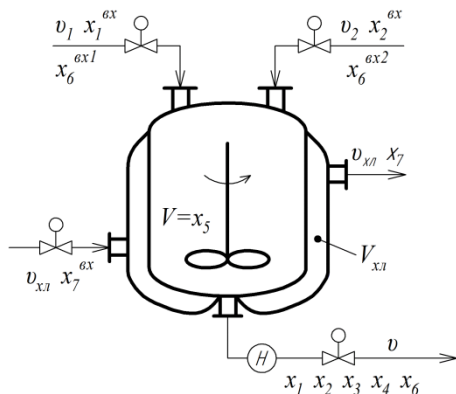


Рисунок 1 - Принципиальная схема химического реактора

На рис. 1 обозначено: x_1^{ex}, x_2^{ex} – концентрации исходных веществ; x_6^{ex1}, x_6^{ex2} – температуры исходных веществ; v_1, v_2 – расходы исходных веществ; v_{xl} – расход хладагента на входе и выходе; x_7^{ex}, x_7 – температуры хладагента на входе и выходе; v – расход смеси на выходе из реактора; x_1, x_2, x_3, x_4 – концентрации веществ A, B, P_1, P_2 в аппарате; x_6 – температура смеси в реакторе; $V=x_5$ – объем реактора; V_{xl} – объем хладагента в теплообменной рубашке.

В соответствии с назначением и целью функционирования реактора основным технологическим параметром, подлежащим стабилизации, является концентрация целевого компонента в аппарате в условиях действия возмущений. Регулирующим входным воздействием является поток исходного реагента v_2 на входе в аппарат [3].

В настоящей работе решается задача синергетического синтеза нелинейного алгоритма управления концентрацией целевого компонента в химическом реакторе методом АКАР, который обладает свойством робастности [1, 2].

Из теории автоматического управления известно, что пропорциональный регулятор не обеспечивает отслеживания изменения задающих воздействий или возмущающих воздействий по нагрузке.

Следовательно, целесообразно синтезировать астатический закон управления концентрацией, обладающий свойством робастности. Для этого в алгоритм управления концентрацией необходимо ввести интегральную составляющую [2].

Согласно методу АКАР, для включения интегратора в алгоритм управления необходимо расширить пространство состояния объекта путем введения нескольких дополнительных переменных состояния [2]. Для решения рассматриваемой задачи необходимо ввести одну дополнительную переменную z_1 , подчиняющуюся уравнению

$$\frac{dz_1}{d\tau} = x_4 - \bar{x}_4, \quad (1)$$

где x_4 , \bar{x}_4 – текущее и заданное значения концентрации целевого компонента в реакторе.

Расширенное математическое описание объекта при условии, что уровень смеси в аппарате стабилизирован ($V=x_5=\text{const}$), запишется:

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{d\tau} &= x_4 - \bar{x}_4, \quad \frac{dx_1}{d\tau} = R_1 + M_A - b_2x_1 - b_3x_1u, \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 - b_2x_2 + (M_B - b_3x_2)u, \quad \frac{dx_3}{d\tau} = R_3 - b_2x_3 - b_3x_3u, \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2x_4 - b_3x_4u, \quad \frac{dx_6}{d\tau} = \alpha_1k_1x_1x_2 + \alpha_2k_2x_1x_3 + \alpha_3k_3x_1x_4 + b_2x_6^{\text{exl}} + \\ &+ \beta_1x_7 - (\beta_1 + b_2)x_6 + (x_6^{\text{exl}} - x_6)b_3u, \quad \frac{dx_7}{d\tau} = \beta_2(x_6 - x_7) + b_1(x_7^{\text{ex}} - x_7), \end{aligned} \quad (2)$$

где $M_A=v_1x_1^{\text{ex}}/V$; $M_B=x_2^{\text{ex}}/V$; $b_1=v_{\text{хл}}/V_{\text{хл}}$; $b_2=v_1/V$; $b_3=1/V$; $\alpha_i=\Delta H_i/(\rho C)$, $i=1, \dots, 3$; $\beta_1=K_T F_T/(\rho C V)$; $\beta_2=K_T F_T/(\rho_{\text{хл}} C_{\text{хл}} V_{\text{хл}})$; $R_1=-k_1x_1x_2-k_2x_1x_3-k_3x_1x_4$, $R_2=-k_1x_1x_2$, $R_3=k_1x_1x_2-k_2x_1x_3$, $R_4=k_2x_1x_3-k_3x_1x_4$ – скорость реакции по компонентам A , B , P_1 , P_2 , соответственно; $k_i=f_i(x_6)$, $i=1, \dots, 3$ – константы скоростей стадий, подчиняющиеся закону Аррениуса; ΔH_i , $i=1, \dots, 3$ – тепловой эффект соответствующей стадии реакции; K_T , F_T – коэффициент теплопередачи и поверхность теплообмена; ρ , C – плотность и теплоемкость реакционной смеси; $\rho_{\text{хл}}$, $C_{\text{хл}}$ – плотность и теплоемкость хладагента; $u=v_2$ – управляющее воздействие.

Согласно решаемой задаче, цель управления химическим реактором заключается в стабилизации концентрации целевого компонента на выходе аппарата на заданном уровне \bar{x}_4 в условиях действия возмущений. В качестве регулирующего воздействия выбран расход реагента B на входе в аппарат – v_2 , который оказывает

непосредственное воздействие на переменную x_4 . Таким образом, канал управления запишется: $u \rightarrow x_4$, где $u = v_2$.

Поскольку управляющее воздействие непосредственно входит в уравнение для переменной x_4 системы (2), то процедура синергетического синтеза закона управления осуществляется за один этап (метод АКАР по заданному инвариантному многообразию) [2].

Синергетическая постановка задачи: необходимо синтезировать закон управления $u(x)$, который переводит объект из произвольного начального состояния (x^0) в фазовом пространстве в окрестность сконструированного многообразия $\psi(x)=0$, а затем обеспечивает его движение вдоль $\psi(x)=0$ в заданное конечное состояние $x_4^k = \bar{x}_4$.

Для поиска закона управления $u(x)$ введем в рассмотрение макропеременную, отражающую технологическое требование к системе:

$$\psi_1 = (x_4 - \bar{x}_4) + \gamma_1 z_1, \quad (3)$$

где γ_1 – настроечный параметр интегральной составляющей.

Макропеременная ψ_1 удовлетворяет решению основного функционального уравнения метода АКАР $T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$, которое в развернутом виде с учетом выражения (3) в силу системы (2) примет вид:

$$T_1 [R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4 u + \gamma_1 (x_4 - \bar{x}_4)] + (x_4 - \bar{x}_4) + \gamma_1 z_1 = 0. \quad (4)$$

Из (4) получаем выражение для закона управления:

$$u = \frac{(x_4 - \bar{x}_4) + \gamma_1 z_1}{T_1 b_3 x_4} + \frac{R_4}{b_3 x_4} - \frac{b_2}{b_3} + \frac{\gamma_1 (x_4 - \bar{x}_4)}{b_3 x_4}. \quad (5)$$

Выражение (5) определяет закон управления концентрацией целевого компонента. Настраиваемыми параметрами закона управления являются постоянная времени T_1 и параметр γ_1 . Условие асимптотической устойчивости замкнутой системы «химический реактор – алгоритм управления» в целом относительно инвариантного многообразия $\psi_1=0$ имеет вид: $T_1 > 0, \gamma_1 > 0$.

Методами имитационного моделирования проведено исследование системы управления концентрацией целевого продукта в химическом реакторе с применением полученного алгоритма. Исследованы свойства инвариантности, ковариантности и асимптотической устойчивости замкнутой системы.

На рис. 2 приведены примеры процессов управления в замкнутой системе «объект – алгоритм управления» при начальном отклонении переменных состояния объекта от статики на 20%. Отклонение вектора

состояния объекта от статических значений может быть обусловлено любым параметрическим или сигнальным возмущением, что приводит к выходу объекта из желаемого состояния равновесия. При этом система автоматического управления должна обеспечивать перевод реактора в заданное конечное состояние, определяемое требуемым значением концентрации ($x_4 = \bar{x}_4 = 0.652$ моль/л).

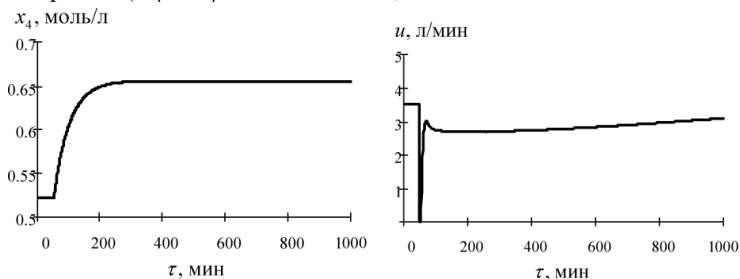


Рисунок 2 - Изменение регулируемой переменной и управляющего воздействия при начальном отклонении переменных состояния от статики ($\Delta x_i = -0,2x_i^0$)

В результате компьютерного моделирования установлено, что замкнутая система «объект – алгоритм управления» не имеет статической ошибки регулирования при действии на объект неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений, изменении задающих воздействий и отклонении начальных условий от статических значений. Таким образом, предложенный нелинейный алгоритм управления концентрацией обладает свойством робастности.

Список литературы:

1. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. Робастное управление температурным режимом химического реактора // Информатика и системы управления. 2018. №3. С.115-123.
2. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат. 1994. 344 с.
3. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. Анализ и оптимальный синтез химического реактора как объекта управления // Химическая Промышленность. 2018. Т.95. №5. С.241-248.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МНОГОСВЯЗНОГО ОБЪЕКТА В ФОРМЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Порхало В.А., канд. техн. наук, доцент,
Валеева Н.С., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В статье рассматривается способ идентификации печи обжига клинкера с помощью нейронной сети. Выделены значимые управляющие и управляемые параметры. В качестве типа сети была выбрана LSTM сеть. Обучение проводится в среде MATLAB, библиотека Deep Learning.

Ключевые слова: идентификация, нейронная сеть, печь обжига.

В настоящее время в России производство цементного клинкера в основном осуществляется во вращающихся обжиговых печах, работающих по «мокрому» способу производства. Процесс обжига является самым энергоемким при производстве цемента, на который приходится около 80% от общих энергозатрат. Поэтому исследование и оптимизация процесса обжига является актуальной задачей.

Создание автоматической системы управления печью обжига с использованием инженерных методов автоматизации затрудняется тем, что процессы в печи являются достаточно сложными с точки зрения математического описания [1], поэтому для разработки системы управления требуется применение научных методов.

Обжиг клинкера на заводах по производству цемента производится во вращающихся печах. Печь обжига представляет собой футерованный изнутри стальной барабан. Печь устанавливается под углом 3–4° к горизонту и вращается вокруг своей оси со скоростью 0,6–1,5 мин в зависимости от диаметра и производительности печи [2].

В процессе работы печи используется принцип противотока. С холодного конца печи подается шлам, а со стороны горячего конца печи подается топливно-воздушная смесь, при горении которой образуется факел. При сгорании топлива образуются горячие газы, которые двигаются навстречу материалу и нагревают его. Материал находится в печи 2–4 часа, в зависимости от угла наклона и скорости вращения [3].

Движущиеся в печи горячие газы нагревают поверхность материала, а также поверхность печи, то есть футеровку. Футеровка передает тепло закрытой поверхности материала через непосредственный контакт, а открытой поверхности посредством

лучеиспускания. Сырьевая смесь получает теплоту либо когда находится на поверхности слоя материала, либо когда происходит соприкосновение с футеровкой. Температура футеровки в каждом секторе печи все время меняется: при нахождении в нижней части траектории вращения печи происходит контакт с материалом и температура снижается, а при нахождении в верхней части траектории происходит контакт с горячими газами и температура футеровки повышается. Данное свойство характеризует сложность установки приборов для непосредственного измерения температуры внутри печи, поскольку происходит постоянное вращение печи и пересыпание материала.

Рассматриваемая цементная печь для мокрого способа производства имеет протяженность 60-120 м, схема автоматизации такой печи содержит от двадцати до тридцати технологических параметров.

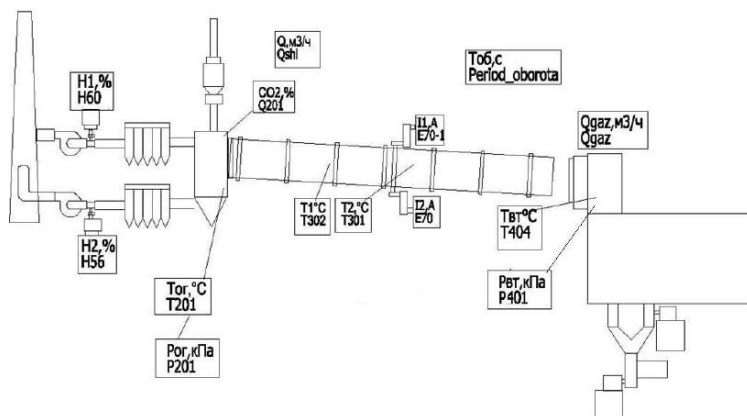


Рисунок 1 - Схема печи обжига с указанием технологических параметров

Для построения математической модели из всей массы переменных необходимо выделить значимые, управляемые переменные, которые характеризуют состояние процесса обжига, и управляющие переменные, изменяя которые оператор печи управляет технологическим процессом. Были выбраны следующие измеряемые и управляемые переменные:

Таблица 1 - Значимые параметры печи обжига

Сигналы печи	Расшифровка обозначений
$Q_{газ}$	Количество природного газа (топлива), подаваемого в печь
H_1, H_2	Положение шиберов дымососов
$T_{ог}, P_{ог}$	Температура и давление отходящих газов
CO_2	Концентрация углекислого газа в отходящих газах
T_1, T_2	Температура материала в зоне подогрева и кальцинирования
$I_{нагр}$	Нагрузка на главном приводе печи
$T_{вт}$	Температура и давление вторичного воздуха
$Q_{шл}$	Количество подаваемого шлама
$t_{об}$	Время оборота печи

Модель печи можно представить в виде многосвязного объекта.

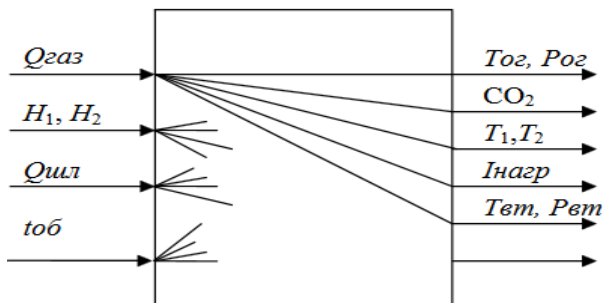


Рисунок 2 - Представление печи как модели многосвязного объекта

Для получения модели печи была обучена нейронная сеть. В качестве типа сети была выбрана LSTM-сеть, которая позволяет обеспечить высокую точность моделирования за счет возможности использования данных из предыдущих итераций.

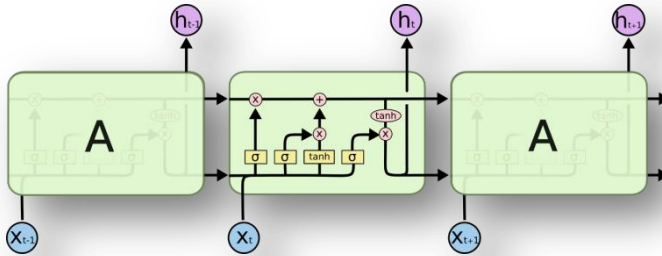


Рисунок 3 - Структура LSTM-сети

Для обучения сети была выбрана среда моделирования MATLAB, библиотека Deep Learning [4, 5].

Для создания слоев сети используется функция layers:

```
layers = [ ...
    sequenceInputLayer(featureDimension)
    lstmLayer(numHiddenUnits,'OutputMode','sequence')
    fullyConnectedLayer(50)
    dropoutLayer(0.5)
    fullyConnectedLayer(numResponses)
    regressionLayer];
```

где `sequenceInputLayer` является входным слоем последовательности, который вводит данные последовательности в сеть; `lstmLayer` – слой LSTM, который обучается на долгосрочных зависимостях между шагами в последовательности данных; `fullyConnectedLayer` – слой, умножающий входные данные на весовую матрицу, а затем добавляющий вектор смещения; `regressionLayer` создает регрессионный выходной слой.

Для обучения сети используется функция `trainNetwork`:

```
net = trainNetwork(Input,Output,layers,options);
```

Для предсказания зависимого параметра используется функция `predict`:

```
T201_Pred = predict(net,Qgaz_mas,'MiniBatchSize',1);
```

Для тестирования сети, прежде чем обучать её на массивах данных печи, было решено проверить сеть на аperiодическом звене.

В качестве входных сигналов были использованы ступенчатый сигнал и белый шум.

Ниже представлены графики выхода обученной сети при подаче на вход ступенчатого сигнала и белого шума.

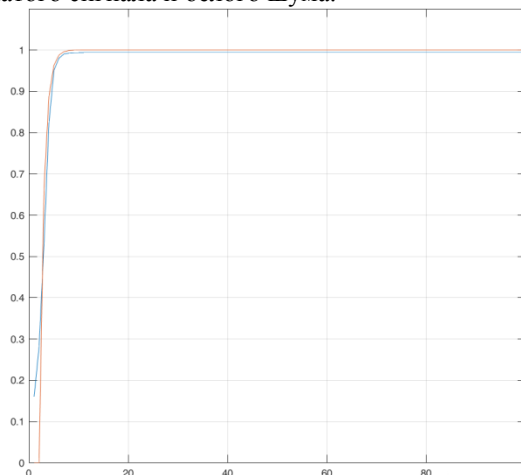


Рисунок 4 - График выхода обученной сети при подаче ступенчатого сигнала

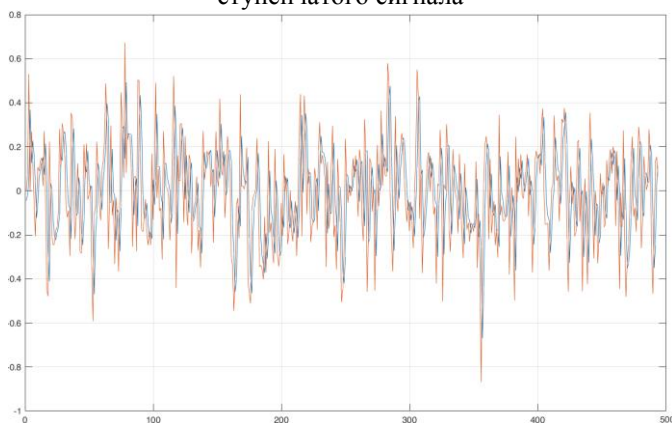


Рисунок 5 - График выхода обученной сети при подаче белого шума в сравнении с истинными значениями выхода объекта в форме аperiodического звена

Таким образом, можно сделать вывод, что на качество обучения влияют такие параметры сети, как количество слоев, эпох, итераций, а так же количество элементов в массивах данных, используемых для

обучения. По результатам обучения видно, что LSTM сети позволяют качественно идентифицировать динамические объекты и могут применяться для идентификации сложных многосвязных объектов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6.

Список литературы:

1. Рубанов В.Г., Порхало В.А. Управление качеством обжига с применением современных средств автоматизации // Цемент. Известь. Гипс (специальный выпуск). 2009. №4. С.141-144.
2. Классен В.К. Обжиг цементного клинкера. Красноярск: Стройиздат, 1994. 322 с.
3. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности. Л.: Стройиздат, 1968. 456 с.
4. Fukushima K. Artificial Vision by Multi-Layered Neural Networks: Neocognitron and its Advances. Neural Networks. 2013. vol. 37. pp. 103–119. DOI: 1016/j.neunet.2012.09.016.
5. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник ЮУрГУ. Вычислительная математика и информатика. 2017. Т.6, №3. С.28-59.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ЗАДАННОЙ КонтРАСТНОЙ ЛИНИИ

Рыбин И.А., ст. преподаватель,
Вакуленко И.Р., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье рассматривается система управления движением мобильного робота по заданной траектории в виде контрастной линии. Была проанализирована работа таких средств автоматизации как фоточувствительная линейка TSL1401, драйвер L298N и разработан алгоритм получения информации и компенсации бокового отклонения при движении робота по трассе.

Ключевые слова: мобильный робот, боковое отклонение, фоточувствительная линейка TSL1401.

В современное время активно развивается робототехника, как для прикладного использования, так и в научных проектах. Роботы играют огромную роль в таких сферах человеческой жизни как медицина, военное дело, сфера обслуживания. Основной целью робототехники является разработка такого автоматизированного механизма, который сможет выполнять поставленные задачи без участия человека. Одной из областей применения мобильных роботов является транспортировка продукции в складских помещениях.

Система навигации автоматически управляемого транспортного средства позволяет исключить человеческий фактор, сократить штат обслуживания складских помещений и уменьшить вероятность ошибки. Однако при разработке системы управления движением мобильного робота возникает несколько задач: планирование траектории движения робота, нахождение кратчайшего пути движения [1], определение бокового отклонения от заданной трассы, остановка в заданной точке.

Данная работа посвящена разработке системы управления боковым отклонением мобильного четырехколесного робота с двумя ведущими и двумя опорными колесами, расположенными по ромбовидной схеме [2], движущегося вдоль проложенной трассы в виде контрастной черной линии на светлой поверхности движения. Маневрирование робота осуществляется за счёт изменения скоростей вращения каждого из двигателей постоянного тока, приводящих в движение ведущие колеса.

В качестве датчика бокового отклонения от трассы выбрана фоточувствительная линейка TSL1401, сигналы с которой передаются устройству управления — микроконтроллеру STM32_F4VE V2.1. По информации, полученной с фоточувствительной линейки, микроконтроллер рассчитывает значение отклонения, на основании которого формирует управляющие напряжения для каждого из двигателей ведущих колес ДПМ-25-Н1-02 в форме ШИМ-импульсов, подаваемых посредством усилительно-преобразовательного элемента — модуля драйвера двигателей L298N (рис. 1).

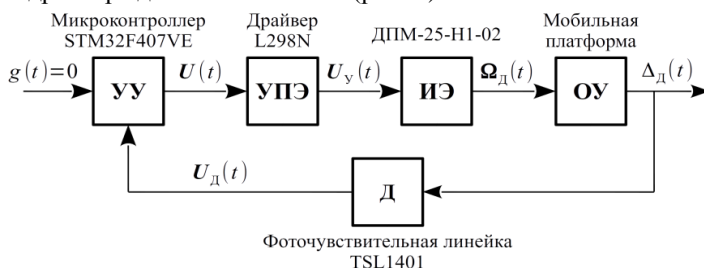


Рисунок 1 - Функциональная схема системы управления мобильным роботом

Используемый фоточувствительный датчик состоит из 128 фотодиодов, расположенных в виде линейной матрицы. Энергия света, падающая на каждый фотодиод, генерирует фототок, который интегрируется соответствующей схемой активной интеграции, вследствие чего сигналы датчика будут зависеть от времени экспозиции. Для запуска измерения на вход датчика SI подаётся импульс, а затем на вход CLK — синхроимпульс. Экспозиция будет продолжаться до следующего импульса на SI. Выходное напряжение генерируется на контакте АО и является аналоговым сигналом, пропорциональным интенсивности света, воспринимаемого отдельным фотодиодом. В результате циклического опроса выхода АО датчика получается сигнал в виде массива из 128 значений напряжений с каждого фотодиода. Подсоединив к датчику осциллограф, можно получить визуализацию его выходного сигнала. На рис. 2 получен сигнал с датчика при боковом отклонении мобильного робота вправо от трассы. Видно, что полученные значения сигналов на фотодиодах слева имеют низкий уровень напряжения, что соответствует их расположению над черной полосой трассы, а фотодиодов справа –

высокий уровень в виду их нахождения над более светлой поверхностью движения.

Драйвер L298N позволяет одновременно управлять скоростью вращения двух двигателей с помощью двух ШИМ-сигналов подаваемых раздельно на входы ENA, ENB. Схема драйвера имеет два дискретных входа IN1, IN2 для управления направлением вращения одного двигателя и два дискретных входа IN3, IN4 — для другого двигателя.



Рисунок 2 - Выходной сигнал при отклонении вправо от линии движения

Причем одинаковые значения на управляющих входах запрещают подачу ШИМ-сигнала на соответствующий двигатель, а при разных значениях в зависимости от того на какой вход подается сигнал логической единицы меняется клемма двигателя, на который подается ШИМ-сигнал, что обеспечивает реверсивность режима его работы.

Таким образом, системы управления боковым отклонением мобильного четырехколесного робота будет состоять из электрических элементов, соединенных между собой как представлено на рис. 3.

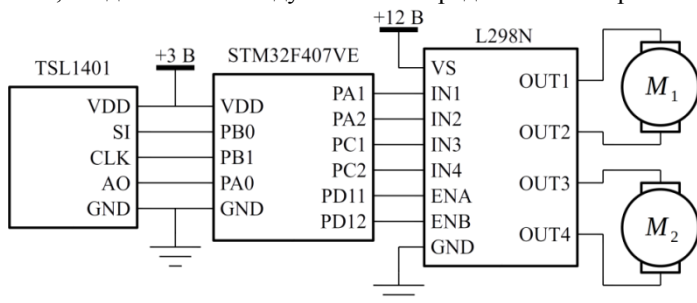


Рисунок 3 - Схема электрических соединений элементов системы управления

Общий алгоритм преобразования информации о боковом отклонении мобильного робота выглядит следующим образом. Управляющий микроконтроллер в процессе движения непрерывно опрашивает датчик. В случае любого смещения робота относительно заданной линии движения показания датчика изменяются. Значения, полученные от фотодиодов, располагающихся над черной линией,

отличаются от тех, которые были получены от фотодиодов, находящихся над светлой поверхностью движения.

На первом этапе определяются границы трассы по значительной разности между сигналами двух соседних фотодиодов и её центр. Так как датчик имеет на выходе 128 значений, то смещение центра трассы относительно положения 64-го фотодиода будет соответствовать величине бокового отклонения мобильного робота.

При движении без отклонения на каждый из двигателей подаётся ШИМ-сигнал, соответствующий 50 % мощности двигателей. При наличии отклонения в зависимости от направления бокового смещения один из ШИМ-сигналов увеличивается, а другой — уменьшается на одинаковую величину. Относительное значение изменения ШИМ-сигналов равно значению смещения в процентах от максимально допустимого бокового отклонения.

В результате была разработана система для определения бокового отклонения мобильного робота, движущегося по трассе, заданной в виде контрастной линии. Выявлены преимущества использования фоточувствительной линейки в качестве датчика: регулирует изменение поступающего светового потока в рабочей области, отсутствие обратного воздействия на объект контроля — бесконтактность. Описан алгоритм формирования ШИМ-импульсов для управления двигателями ведущих колёс мобильного робота в зависимости от бокового отклонения.

Список литературы:

1. Вакуленко И.Р., Бушуев Д.А. Построение кратчайшего пути на складе для автоматически управляемого транспортного средства. 2018. С.20-25.
2. Рыбин И.А., Рубанов В.Г. Математическая модель системы управления мобильного транспортного средства // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. №5. С.333-339.
3. Рубанов В.Г., Кижук А.С. Мобильные микропроцессорные системы автоматизации транспортно-складских операций. Мобильные робототехнические системы. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 289 с.
4. Подлесный Н.И., Рубанов В.Г. Элементы систем автоматического управления и контроля. К.: Выща шк., 1991. 461 с.
5. Добринский Е.П., Бушуев Д.А., Магергут В.З., Бажанов А.Г. Разработка автоматизированной транспортно-складской системы с групповым управлением робокаров // Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды: сб. трудов VII Междунар. симпозиума, 2013. С.410-418.

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОЙ КОЛЕСНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рыбин И.А., ст. преподаватель,
Маньшин И.М., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос разработки автономной аппаратной платформы на основе микрокомпьютера Raspberry Pi. Предложен алгоритм движения мобильного робота по контрастно заданной трассе.

Ключевые слова: автономная платформа, движение по контрастной линии, алгоритм движения.

Одной из наиболее быстро развивающейся области робототехники является мобильная робототехника. Особый интерес проявляется к автономным транспортным средствам, предназначенным для решения таких задач, как патрулирование территории, оценка экологического состояния и других [1]. Автономным транспортом, в свою очередь, являются такие виды транспорта, управление которыми осуществляет автономная система управления, при разработке которой от специалиста требуются знания и навыки в разных областях.

Чтобы помочь учащимся освоить различные аспекты разработки систем управления мобильных роботов, был создан макет мобильной платформы с двумя ведущими и двумя опорными колесами, расположенными по ромбовидной схеме. Поставленной задачей перед автономным аппаратом было движение по контрастно заданной трассе.

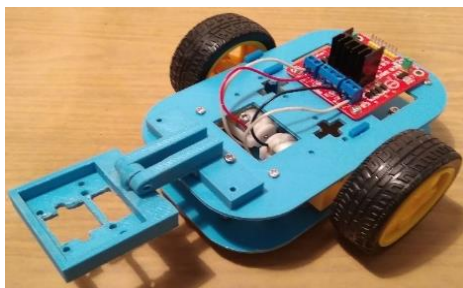


Рисунок 1 - Мобильная колесная платформа

Аппаратная платформа представляет собой две пластины размером $100 \times 160 \times 3$ мм (рис. 1). В качестве движителей используются два колеса диаметром 75 мм, расположенных на расстоянии $T=100$ мм, независимо приводимых в движение электрическими мотор-редукторами напряжением 12 В. Для определения положения платформы относительно трассы используется фоточувствительная линейка TSL1401 [2]. Измерения скоростей вращения колес осуществляется с помощью инкрементальных энкодеров.

Микрокомпьютер Raspberry Pi В+ в связке с микроконтроллером Arduino Uno осуществляет управление платформой. Для управления работой двигателей предназначен силовой модуль расширения. Операционной системой бортового компьютера является Raspbian. Микроконтроллер управляется специализированным ПО, принимающим информацию от всех датчиков платформы и передающим ее на бортовой компьютер. Кроме того, ПО микроконтроллера принимает команды от микрокомпьютера и управляет работой ведущих двигателей в соответствии с этими командами.

Оборудования платформы обеспечивается питанием от литий-ионных аккумуляторов напряжением 3,7 В, номинальной емкостью 2 А·ч. Структура такой системы представлена на рисунке 2.

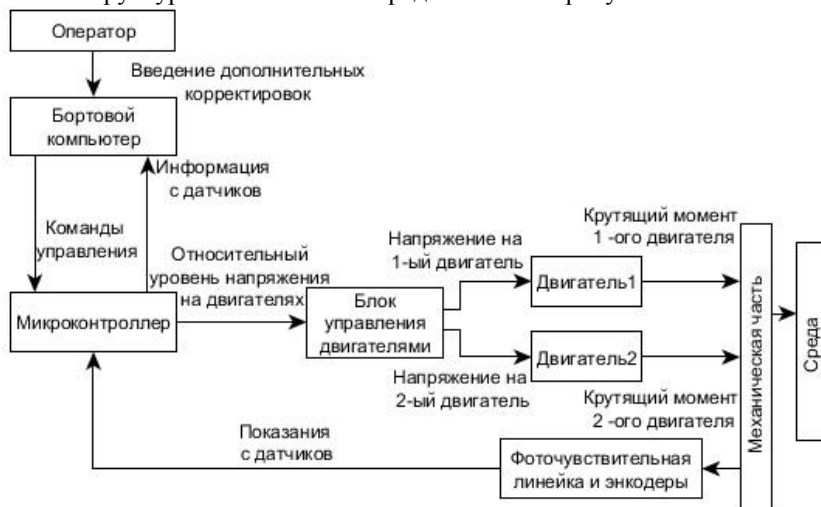


Рисунок 2 - Структура системы

Основной частью системы является программный комплекс, включающий в себя сервер обработки данных, поступающих с датчиков и алгоритма, оценивающего информацию от сенсоров и формирующий сигналы управления перемещением платформы. Функционирование системы управления платформой можно представить в виде следующих шагов [3-5]:

1. Получение данных с фоточувствительной линейки и энкодеров.
2. Локализация мобильного робота относительно трассы.
3. Формирование команд управления мобильной платформой.

Определение положения робота относительно трассы происходит с помощью датчика TSL1401. Это линейка из 128 фоточувствительных сенсоров, в виде законченного модуля с объективом. Преимущество датчика по сравнению с видеокамерой заключается в том, что методы машинного зрения требуют большое количество вычислительных ресурсов [2].

Проведя один из экспериментов и построив график зависимости значения на выходе сенсора от его номера (рис. 3), зададим уровень L , результат сравнения сигнала с которым будет определять, располагается сенсор над контрастной линией или нет. Определяя номера сенсоров, находящихся на границе (прямые A и B) трассы, заданной в виде полосы, можно определить центр линии трассы (C_{line}), смещение которого относительно положения центрального сенсора (C_{64}) определяет отклонение d мобильной платформы от трассы.

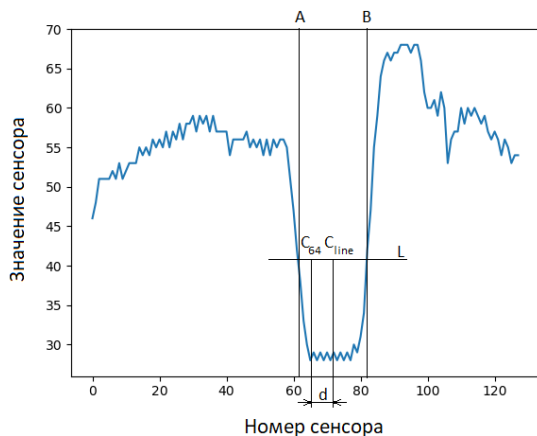


Рисунок 3 - График полученных с датчика значений

Алгоритм движения робота по контрастной линии (рис. 4) можно разбить на два этапа:

1. Определение ориентации датчика относительно центра линии.
2. Формирование необходимых угловых скоростей на каждом из двигателей.



Рисунок 4 - Блок-схема алгоритма движения робота по контрастной линии

К первому этапу относятся определение уровня L путем начальной калибровки и нахождение величины отклонения d . Далее, зная d , можно найти угловую скорость мобильного робота $\omega = \omega_{\max} \cdot d/64$, где 64 – количество сенсоров в обеих сторон от C_{64} , отношение $d/64$ – величина процента от максимально возможного расстояния. Располагая еще продольной скоростью V , радиусом колеса r и расстоянием между колесами T находится угловые скорости каждого из колес:

$$\omega_R = \frac{1}{r} \left(v + \frac{\omega \cdot T}{2} \right),$$

$$\omega_L = \frac{1}{r} \left(v - \frac{\omega \cdot T}{2} \right).$$

В соответствии с этим определяется и уровень напряжения, подаваемого на двигатель.

Недостатком такого алгоритма является использование контрастной линии без ветвлений.

Работа выполнена в рамках государственного задания РФ 2.1396.2017/ПЧ «Разработка методов обеспечения живучести интеллектуальных бортовых систем управления беспилотных транспортных средств».

Разработанная подвижная платформа позволяет проводить широкий спектр исследований и опытно-конструкторских работ, а также для обучения студентов соответствующих направлений. Перспективным направлением развития будет модернизация алгоритма, который будет осуществлять соответствующую реакцию на определенный шаблон перекрестка, и разработка программного комплекса для ПК, предназначенного для передачи данных о состоянии мобильного робота оператору.

Список литературы:

1. Зотин А.Г., Саяпин А.В. Учебная распределенная система управления мобильной колесной платформой с использованием видео- и сенсорной информации // Программные продукты и системы. 2016. №113. С.146-151.
2. Фоточувствительная линейка TSL1401 // Robotclass. URL: <http://robotclass.ru/articles/line-sensor-tsl1401/> (дата обращения: 30.03.2019).
3. Рубанов В.Г., Кижук А.С. Мобильные микропроцессорные системы автоматизации транспортно-складских операций. Мобильные робототехнические системы: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 288 с.
4. Власов С.М., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 169 с.
5. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.

МУЛЬТИМЕДИЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕПОДАВАНИИ ДИСЦИПЛИНЫ АВТОМАТИЗАЦИЯ

**Сельская И.В., канд. хим. наук, доцент,
Саливон Ю.И., ст. преподаватель**
*Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры*

Аннотация. В обучении используются мультимедийные технологии, спектр которых заметно расширился: от создания обучающих программ до разработки целостной концепции построения образовательных программ. Преподавания дисциплины «Автоматизация» является приобретение комплекса специальных знаний и умений, необходимых для организации высокоэффективных автоматизированных производственных процессов в строительстве. Создан и введен в учебный процесс учебный лабораторный «КОМПЛЕКС» для моделирования технологических процессов в строительстве и выполнения прикладных исследовательских работ.

Ключевые слова: автоматизация, интерактивные и мультимедийные технологии, учебный процесс, «КОМПЛЕКС», управляющие и исполнительные устройства.

Стремительно развивающиеся информационно-коммуникационные технологии требуют от современного вуза внедрения новых подходов к обучению, обеспечивающих развитие коммуникативных, творческих и профессиональных знаний, потребностей в самообразовании. Внедрение таких технологий в учебный процесс переходит на новый этап – внедрение новых мультимедийных учебных материалов [1,2]. В настоящее время создано большое количество разнообразных информационных ресурсов, которые существенно повысили качество учебной и научной деятельности [1,2]. Все чаще в обучении используются мультимедийные технологии, спектр которых заметно расширился: от создания обучающих программ до разработки целостной концепции построения образовательных программ в области мультимедиа, формирования новых средств обучения [2]. Это позволяет сделать программный продукт информационно насыщенным и удобным для восприятия, стать мощным дидактическим инструментом, благодаря своей способности одновременного воздействия на различные каналы восприятия информации [3].

Согласно последним нормативным документам Министерства образования и науки ДНР программа дисциплин, преподаваемых в академии должна быть согласована с новыми нормативными стандартами, учитывать последние достижения в науке и технике, учитывать потребности технических специальностей строительного профиля и использовать компетентностные подходы для системы организации учебного процесса.

На кафедре «Автоматизация и электроснабжение в строительстве» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры для студентов направления подготовки – 08.03.01 «Строительство» читается дисциплина «Автоматизация» с разделением на профили подготовки. Для каждого профиля введены такие дисциплины: «Автоматизация производственных процессов в строительстве», «Автоматизация производственных процессов строительных материалов, изделий и конструкций», «Автоматизация производственных процессов в строительстве и эксплуатации автомобильных дорог», «Автоматизация систем ВВ», «Автоматизация систем ТГВ», «Автоматизация систем ГСХ (проект «Умный дом»)».

Согласно изложенному, данная работа является в настоящее время актуальной, так как новые введенные дисциплины с учетом новых нормативных стандартов, с использованием компетентностных подходов [4] и с применением интерактивных и мультимедийных технологий требуют детального и серьезного подхода в процессе преподавания.

Автоматизация производственных процессов есть совокупность мероприятий по разработке технологических процессов, созданию и внедрению высокопроизводительных автоматически действующих средств производства, обеспечивающих непрерывный рост производительности труда. Автоматизация способствует значительному повышению производительности труда, улучшению качества продукции и условий труда людей. Автоматизация – это комплексная конструкторско-технологическая задача создания принципиально новой техники на базе прогрессивных технологических процессов обработки, контроля, сборки.

Целью преподавания этой дисциплины является расширение мировоззрения студентов и приобретение комплекса специальных знаний и умений, необходимых для организации высокоэффективных автоматизированных производственных процессов в строительстве. Преподавание дисциплины автоматизация, должно обязательно соответствовать двум следующим требованиям: во-первых, курс

автоматизация должен быть изложен последовательно и гармонично, чтобы предоставить студенту четкое представление об автоматизации, как о современной науке. Во-вторых, курс автоматизация для инженерно-строительных специальностей должен быть четко ориентирован именно на нужды инженера-строителя той или иной профессии. Формирование у студентов научного мировоззрения и современного научного мышления. Учет особенностей различных специальностей при преподавании курса автоматизация надо проводить также путем рассмотрения на лекциях примеров практического использования процесса автоматизации в соответствующих отраслях строительства.

В процессе изучения дисциплины «Автоматизация» студент должен:

1. Усвоить знания по общим закономерностям и тенденции развития современного автоматизированного производства.

2. Знать основы построения, методы расчета технологических процессов автоматизированного производства, принципы проектирования автоматизированных станочных систем, цехов, предприятий.

3. Уметь оценивать уровень автоматизации производства.

4. Разрабатывать и организовывать оптимальные технологические процессы для условий автоматизированного производства.

5. Управлять производственными процессами с применением современных средств автоматизации и вычислительной техники.

6. Пользоваться новыми методами автоматического контроля производственных процессов и качества выпускаемой продукции.

7. Применять работы и манипуляторы для повышения эффективности производства.

Введение новых дисциплин требует создание новой лабораторной базы на основе компьютерных технологий.

На кафедре «Автоматизация и электроснабжение в строительстве» создан и введен в учебный процесс учебный лабораторный «КОМПЛЕКС» для моделирования технологических процессов в строительстве и выполнения прикладных исследовательских работ в области материаловедения и эксплуатации конструкций и сооружений.

«КОМПЛЕКС» позволяет создавать действующие автоматизированные системы по следующим направлениям: производство строительных материалов; испытание строительных конструкций на прочность; решение задач термодинамики при испытаниях материалов на теплопроводность; изучение акустических

характеристик и звукоизолирующих свойств ограждающих конструкций и поверхностей; исследование влияния метеорологических факторов и приземных атмосферных явлений на надежность эксплуатации сооружений, имеющих сложную пространственную геометрию; исследование вибрационных свойств объектов, амплитудно-частотный анализ резонансных явлений.

«КОМПЛЕКС» содержит ряд задающих, управляющих и исполнительных устройств:

- тестовый генератор теплового потока регулируемой производительности;

- источник воздушного потока на базе двигателя постоянного тока с двухконтурной системой регулирования методами фазоимпульсного и широтноимпульсного управления;

- высоколинейный акустический излучатель с повышенным уровнем звукового давления;

- вибромашину для низкого и инфранизкого диапазона гармонических колебаний и ударных воздействий.

Комплект измерительной аппаратуры базируется на линейке приборов фирмы «ОВЕН». При этом в структуре «КОМПЛЕКСА» можно выделить ряд подсистем:

- измерительно- регулирующую, выполняющую функции первичной обработки сигналов датчиков и подготовки управляющих воздействий;

- тензометрическую для проведения специальных измерений с помощью датчиков усилий, деформаций и тензодинамометров;

- индикационно- управляющую для выдачи управляющих воздействий по протоколу и индикации их текущих значений;

- силовую для регулирования числа оборотов двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей;

- прецизионные электронные весы;

- интерфейсную для коммутирования информационных потоков.

Программно технологические проекты создаются с помощью следующих SCADA-систем: «OWEN PROCESS MANAGER» (OPM), «MASTER SCADA» (MS) фирмы «ИнСАТ» и цифрового спектрального акустического анализатора «SpektraLAB». При этом с помощью OPM и MS реализуются как измерительно- управляющие функции, так и экспертно- предупредительная сигнализация о внепредельных и аварийных ситуациях. Программа «SpektraLAB» позволяет регистрировать и анализировать спектры как гармонических, так и

ударных воздействий и интерпретировать их в виде таблиц, графиков и спектрограмм.

«КОМПЛЕКС» построен по функционально блочному принципу агрегатирования программно технических средств, допускающему несложные способы его адаптации к конкретному набору решаемых задач и оперативное конфигурирование технологических проектов.

Открытая архитектура позволяет наращивать возможности «КОМПЛЕКСА» в соответствии с требованиями решаемых задач. Создание технологических проектов при таком подходе сводится к формализации и алгоритмизации процесса с последующим конфигурированием требуемой структуры с помощью специализированных программных модулей.

Использование средств наглядности при использовании современных педагогических технологий позволяет повысить уровень обучения: значительно увеличивается наглядность курса, при этом решается вопрос с созданием, дополнением, расширением материальной базы наглядности [3,5]. Появление интерактивных средств обучения обеспечивает такие новые формы учебной деятельности, как регистрация, сбор, накопление, хранение, обработка информации об изучаемых объектах, явлениях, процессах, передача достаточно больших объемов информации, представленных в различной форме, управление отображением на экране моделями различных объектов, явлений и процессов [3,5]. Наглядные материалы должны отвечать общедидактическим, эргономическим и методическим требованиям, от соблюдения которых может зависеть скорость восприятия учебной информации, ее понимание, усвоение и закрепление полученных знаний. Наглядность средств обучения в преподавании дисциплины автоматизация играет важную роль в формировании информационно-интегрированной образовательной среды и решает целый комплекс современных дидактических, методических, психологических вопросов.

Список литературы:

1. Захарова И.Г. Информационные технологии в образовании: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений: 6-е изд., стер. / М.: Издательский центр «Академия», 2010. 192 с.
2. Сумина Г.А., Ушакова Н.Ю. Использование мультимедийных технологий в учебном процессе ВУЗа // Успехи современного естествознания. 2007. №5. С.76-78.
3. Полат Е.С., Бухаркина М.Ю. Современные педагогические и информационные технологии в системе образования: учеб. пособие

- для студ. высш. учеб. заведений: 3-е изд., стер. / М.: Издательский центр «Академия», 2010. 368 с.
4. Никитина Т.В. Компетентностный подход как методологическая основа высшего образования // Вестник Кемеровского Государственного университета. 2015. No 2 (62). Т. 3. С.88-91.
 5. Панина Т.С. Современные способы активизации обучения: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.: Издательский центр «Академия», 2012. 176с.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ВИБРАЦИОННОГО ПРИВОДА МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Семернин А.Н., канд. техн. наук, доцент,

Аверкин Н.С., аспирант

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В статье рассмотрен подход к разработке виброимпульсного привода транспортного средства; приведены общие свойства вибрационных машин, рассмотрены конструкции дебалансных вибраторов; рассмотрена методика получения линейной модели вибрационной машины с дебалансным вибратором направленного действия; указаны параметры, влияющие на амплитуду колебаний вибрационной машины; представлен вариант конструкции машины с виброимпульсным приводом и рассмотрены особенности его работы.

Ключевые слова: вибрационная машина, дебалансный вибратор, амплитудно – частотная характеристика, виброимпульсный привод.

Как правило, процессы, связанные с колебаниями приводят к авариям механического оборудования, разрушению строительных конструкций и рассматриваются как негативный фактор, с которым необходимо бороться в технике. Однако в XX веке получило интенсивное развитие новое научное направление – вибрационная механика, которая применяется при разработке вибрационной техники. Высокоэффективные технологические машины находят широкое применение в различных отраслях промышленности [1]. Проблемы проектирования подобных машин связаны с нелинейными процессами, возникающими при их работе, в результате комбинации нескольких накладывающихся друг на друга факторов. Большой вклад в развитие вибрационной механики внёс академик П.Л. Капица, опубликовавший в 50 – х годах XX века работы “ ... о динамической устойчивости перевернутого маятника с вибрирующей осью подвеса” [2].

Принцип работы вибрационных машин основан на создании в них вынужденных колебаний, которые создаются вибраторами различной конструкции. С помощью таких машин происходит измельчение и дробление, транспортировка, перемешивание различных материалов, уплотнение бетонной смеси. Несмотря на разнообразие в конструкциях вибрационных машин, они имеют общие свойства:

1. Вибрационная машина представляет собой колебательную систему, состоящую из дебалансного вибратора и колеблющейся массы.

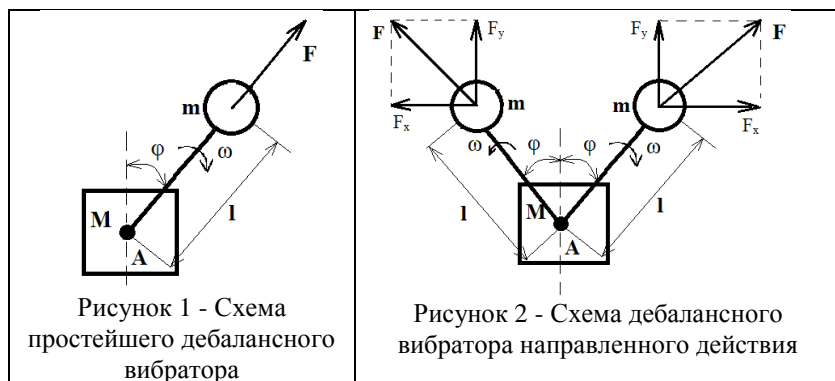
2. Рабочий процесс в вибромашине зависит от суммарного эффекта повторяющихся циклов, причем эффективность работы машины повышается с увеличением частоты вибраций.

Простейший дебалансный вибратор (рис.1) состоит из неуравновешенной массы m , удаленной от оси вращения A на расстояние l и вращающейся с угловой скоростью ω . Сила инерции дебаланса F вычисляется по формуле (1).

$$F = m \cdot l \cdot \omega^2 \quad (1)$$

Сила инерции дебаланса F , через ось вращения A , передается массе M , представляющей рабочий орган вибромашины.

Конструкция вибратора направленного действия (рис. 2) состоит из 2-х дебалансов, вращающихся с одинаковой скоростью ω в противоположенных направлениях.



Как видно из рис. 2, суммарная сила инерции образуется в результате сложения составляющих F_y центробежных сил.

$$F = 2 \cdot F_y = 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot l \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

Если выполняется условие $\omega = \omega_1 = \omega_2 = \text{const}$, угол смещения вектора силы относительно вертикальной оси $\varphi = \omega \cdot t$ и формула (2) может быть записана в виде:

$$F = 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot l \cdot \cos\omega t \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что суммарная сила инерции изменяется по гармоническому закону.

Траектория движения массы M определяется конструкцией подвески вибромашины, свойствами окружающей среды и механической характеристикой электрического двигателя, вращающего дебаланс массой m . Для анализа динамических свойств вибрационной

машины, необходимо записать математическую модель. Уравнение движения вибрационной машины записывается с учетом:

- возбуждающей силы вибратора;
- восстанавливающих сил, зависящих от конструкции подвески машины;
- силы взаимодействия вибрирующего органа со средой;
- инерционных сил рабочего органа.

Динамическая модель вибрационной машины [3] может быть представлена схемой (рис. 4). Возбуждающая колебания сила F создается дебалансным возбудителем направленного действия. Под действием гармонической силы F в движение приводится масса M , связанная с исполнительным органом машины. С учетом уравнения (3) запишем гармоническую силу в виде:

$$F = A \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

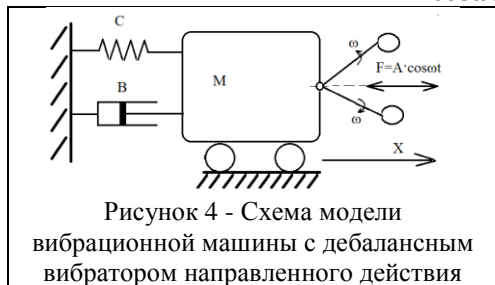


Рисунок 4 - Схема модели вибрационной машины с дебалансным вибратором направленного действия

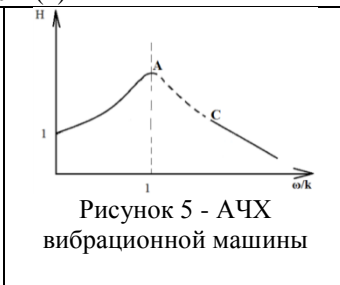


Рисунок 5 - АЧХ вибрационной машины

где $A = 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot l$ – амплитудное значение возбуждающей силы.

Выразим через x - линейную координату перемещения массы M .

Результирующая сила, действующая на массу M , равна разности приложенной силы F , силы упругости $F_{уп}$ и силы демпфирующего устройства $F_{ду}$.

$$F_{рез} = F - Cx - B \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

где C – коэффициент жесткости подвески машины, B – константа демпфирующего устройства.

С учетом того, что сила $F_{рез}$ заставляет массу M двигаться с ускорением a , можно записать

$$F - Cx - B \frac{dx}{dt} = M \frac{d^2x}{dt^2} \quad (6)$$

или

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Cx = A \cos \omega t \quad (7)$$

Приведем уравнение (7) к виду:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2n \frac{dx}{dt} + k^2x = a \cdot \cos \omega t \quad (8)$$

где $2n=B/M$; $k^2=C/M$; $a=A/M$

Решение дифференциального уравнения (8) с учетом вынужденных колебаний массы M имеет вид:

$$x = \frac{a}{\sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \cdot \omega^2}} \cdot \cos(\omega t - \delta) = H \cdot \cos(\omega t - \delta) \quad (13)$$

где δ – сдвиг фаз между изменением возбуждающей силы и перемещения массы M .

$$\delta = \arctg \frac{2 \cdot n \cdot \omega}{k^2 - \omega^2} \quad (14)$$

H – амплитуда колебаний массы M .

$$H = \frac{a}{\sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot n^2 \cdot \omega^2}} \quad (15)$$

Интенсивность работы вибромашины определяется амплитудой колебаний и частотой возбуждающей силы вибратора. Амплитуда колебаний зависит от следующих параметров:

- массы M , приводимой в движение вибромашинной;
- коэффициента жесткости C устройства;
- коэффициента демпфирования B устройства;
- величины амплитуды возбуждающей силы A ;
- угловой скорости вращения ω дебаланса.

Изменяя эти параметры можно управлять движением вибромашины. Амплитудно – частотная характеристика (АЧХ) вибрационной машины имеет вид (рис. 5). Из характеристики видно, что амплитуда колебаний H зависит от соотношения между k и ω . Энергетически эффективный режим работы вибромашины находится за резонансным участком АЧХ, однако при попытке получить режим колебаний на участке АС в линейной колебательной системе проявляются свойства неустойчивости. Система переходит на режим колебаний в точку А или точку С, что требует дополнительного изучения и описания рассмотренного устройства в виде нелинейной модели. В реальной модели упругая сила подвески и демпфирующая сила – нелинейные, скорость вращения дебалансов может изменяться по заданному закону. В нелинейной модели необходимо учитывать также характеристики двигателя.

Рассмотрим вариант конструкции машины с виброимпульсным приводом (рис. 6). Виброимпульсное транспортное средство состоит из

рамы 4, опирающейся на колёса 2, внутри колёс находятся муфты свободного хода 1. Мобильное средство приводится в движение инерционным само балансным механизмом 5, воздействующим на раму 4 упругими элементами 3. При этом создается продольная сила F воздействующая на колеса 2. Муфты свободного хода установлены так, что позволяют осуществлять движение только в одну сторону. Наличие упругих элементов позволяет увеличить силу F передаваемую на колёса в результате сложения силы вибратора и сжатых пружин во время нахождения колёс в заторможенном состоянии.

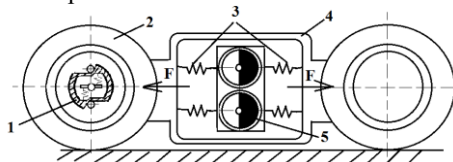


Рисунок 6 - Виброимпульсный привод транспортного средства.

В отличие от “классических” приводов, работа виброимпульсного привода имеет следующие особенности:

- движущая сила приложена не к колёсам транспортного средства, а к его раме;
- инерционный привод создает силу, периодически изменяющую свое направление, поэтому для обеспечения направленного движения транспортного средства необходимо создать асимметрию равнодействующей движущих сил и сил сопротивления;
- энергетически эффективный режим работы вибромашины находится за резонансным участком амплитудно – частотной характеристики.

Список литературы:

1. Гончаревич И.Ф. Вибрация - нестандартный путь: вибрация в природе и технике. М.: Наука, 1986. 209 с.
2. Капица П.Л. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса // Журн. эксперимент. и теор. физики. 1951, № 5. С.588–597.
3. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400 с.

ПЛАСТИФИКАТОР НА ОСНОВЕ РАПСОВОГО МАСЛА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Соловьев В.В., канд. техн. наук, доцент,

Гасанова Н.В., студент,

Волков И.М., студент

Ярославский государственный технический университет

Аннотация. Осуществлено испытание применения в качестве пластификатора в рецептуре протекторной резиновой смеси для зимних нешипуемых шин ряда продуктов, полученных на основе рапсового масла. На основе анализа вулканизационных и вязкоупругих характеристик смесей реализован выбор пластифицирующих агентов для расширенных испытаний.

Ключевые слова: пластификатор, вязкоупругие свойства, вулканизационные характеристики, рапсовое масло, эластомерный композиционный материал.

Одним из путей решения экологических проблем современности является поиск биоразлагаемых альтернативных углеводородных источников сырья для строительных и композиционных материалов. В последнее время эта проблема остро возникла для отечественной шинной и резино-технической промышленности, а именно в области использования экологически чистых пластификаторов, которые должны быть легко совместимы с каучуками общего назначения и биоразлагаемы при утилизации отслуживших свой срок автопокрышек или резино-технических изделий, применяемых в строительстве. Все это обусловлено не только необходимостью снижения загрязнения окружающей природной среды, но и важностью перехода от исчерпаемых сырьевых источников к расширенному использованию возобновляемых ресурсов [1].

Возобновляемость сырьевых ресурсов и относительная дешевизна по сравнению с трудно разлагаемыми, эколого-опасными синтетическими продуктами обуславливают в настоящее время целесообразность расширения работ по применению растительных масел в химии и химической технологии. Высокая стоимость и дефицитность синтетических сложноэфирных пластификаторов (дибутилфталата или дибутилсебадината) при биоразлагаемости близкой к растительным маслам (80-95%) существенно ограничивают их применение. Весьма важен тот факт, что использование

растительных масел и жиров, а также отходов их переработки, возможно не только в производстве практически всех видов пластификаторов, но и при производстве иных ингредиентов резино-технических изделий и композиционных материалов. Все это открывает возможность получения резино-технических изделий и композиционных материалов, произведенных исключительно на продуктах растительного происхождения.

В России данному вопросу должного внимания пока не уделяется по причине преимущественного использования пластификаторов, получаемых на основе продуктов переработки нефти. Однако постепенная интеграция страны в мировое сообщество неизбежно выдвигает вопрос замены токсичного нефтяного сырья на экологически чистые продукты природного происхождения. Это связано с тем, что, в настоящее время за рубежом в законодательном порядке предусматривается использование основных компонентов резино-технических изделий и иных композиционных материалов на базе сырья растительного происхождения с целью охраны окружающей среды.

Мировое производство рапсового масла неуклонно расширяется и достигло в 2014 году более 23 млн. т, из которых порядка 10% используется для технических целей [2].

В Российской Федерации в 2014 году было произведено 1,46 млн.т. рапсовых семян из которых было изготовлено рапсовое масло для внутреннего потребления, а избыток его в количестве 356,5 тыс. тонн был реализован за рубеж [2], так как на сегодняшний день оно пока еще не находит квалифицированного применения в химической технологии России [3].

В настоящей работе рассматривается вопрос о возможности использования части невостребованного рапсового масла в качестве пластификатора резино-технических изделий и иных композиционных материалов, который бы мог обеспечить необходимые пластическо-эластические свойства резиновых смесей и полимеров, а также придавал резинам упруго-гистерезисные и морозостойкие свойства. В этом случае получаемые смеси после процесса вулканизации могут быть рекомендованы для производства протекторных резин используемых в технологии получения зимних нешипуемых (фрикционных) шин [4].

В работе использовалось рапсовое масло 2-го сорта производства компании «АСТОН», вырабатываемое по ГОСТ 8988. Для оценки физико-химических и эксплуатационных свойств исследуемых масел применяли стандартные методы испытаний. Молярную массу (г/моль)

определяли по ГОСТ 25794.3-83. Температуру застывания (°С) определяли по ГОСТ 20287. Плотность при 20 °С (кг/м³) определяли по ГОСТ 3900 и по ГОСТ Р 51069. Кислотное число (мг КОН/г) определяли по ГОСТ 52110-2003. Иодное число (гI₂/100 г) определяли по ГОСТ 5475-69. Температуру вспышки (°С) определяли по ГОСТ 6356. Массовую долю неомыляемых веществ (%) определяли по ГОСТ 5479-64. Массовую долю жирных кислот в безводном продукте (%) определяли по ГОСТ 5479-64. Массовую долю воды (%) определяли по ГОСТ 11812.

Основные физико-химические показатели объекта исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристика рапсового масла 2-го сорта производства компании «АСТОН»

Физико-химические показатели рапсового масла								
Молярная масса, г/моль	Температура застывания, °С	Плотность при 20 °С, кг/м ³	Кислотное число, мг КОН/г	Иодное число, не более гI ₂ /100 г	Температура вспышки, °С	Массовая доля неомыляемых веществ, %, не более	Массовая доля жирных кислот в безводном продукте, %, не менее	Массовая доля воды, %
~886	Минус 15	916	3,5	112	221	2,9	96,3	следы

Анализ данных, приведенных в таблице 1 показывает, что сырое рапсовое масло по низкотемпературным свойствам (температура застывания минус 15, °С) приближается к маслам, которые склонны к процессу кристаллизации при низких температурах [5]. Одновременно с этим масло имеет сравнительно высокое кислотное число (3,5 мг КОН/г) из-за повышенного содержания свободных жирных кислот. Также следует отметить высокий процент неомыляемых веществ (2,6 %). Поэтому, для использования рапсового масла в качестве пластификатора резиновых смесей необходимо придать ему низкотемпературные свойства, определенный запас щелочности, снизив кислотное число и уменьшить содержание неомыляемых веществ,

которые способствуют увеличению температуры застывания.

В настоящей работе для удаления свободных жирных кислот и облагораживания сырого рапсового масла использовался метод щелочной нейтрализации [6]. Сущность его заключается во взаимодействии свободных жирных кислот с водным раствором гидроксида натрия [7]. При этом образуются практически нерастворимые в рапсовом масле мыла, в которые за счет процесса солубилизации переходит часть неомыляемых веществ. В ходе предварительных исследований было установлено, что для обеспечения ускорения протекания реакции и смещения равновесия в сторону образования мыл, количество гидроксида следует брать с некоторым избытком по сравнению с теоретически необходимым количеством для нейтрализации кислот [8,9]. В ходе исследований было показано, что при недостатке гидроксида происходил гидролиз мыла, приводящий к образованию кислых мыл, плохо растворимых в воде.

Нейтрализацию сырого рапсового масла предложено вести в противоточном реакторе непрерывного действия [10,11]. Реактор представляет собой колонну, заполненную насадкой. Реактор снабжен рубашкой для подогрева, а также гидрозатвором для предотвращения попадания воздуха в рабочую зону аппарата. Схема аппарата представлена на рисунке.

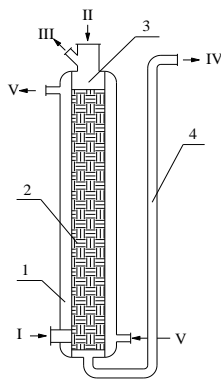


Рисунок – Реактор для проведения нейтрализации

I – сырое рапсовое мало; II – водный раствор щелочи; III – очищенное рапсовое мало; IV – раствор мыла; V – вода для подогрева;
1 – рубашка для подогрева; 2 – керамическая насадка; 3 – сепарационная зона; 4 – гидрозатвор

Сырое рапсовое масло подается в нижнюю часть реактора. В верхнюю часть реактора подается водный раствор щелочи. Двигаясь противотоком, щелочь нейтрализует кислоты, присутствующие в сыром рапсовом масле. При этом образуются растворимые в воде мыла с солюбилизированными неомыляемыми веществами и иными примесями, которые увлекаются в нижнюю часть реактора, а затем выводятся из реактора через гидрозатвор. Нейтрализованное рапсовое масло в диспергированном состоянии распределяется в водно-щелочном растворе и благодаря разности плотностей поднимается вверх и попадет в сепарационную зону, где дополнительно отстаивается и выводится из реактора. При проведении непрерывной нейтрализации важно поддерживать такой режим работы аппарата, чтобы была видна четкая граница раздела фаз. Также необходимо поддерживать границу раздела фаз на постоянном уровне за счет регулирования расхода подаваемых на нейтрализацию реагентов.

При концентрации водного раствора щелочи – 3 %, молярном соотношении эфиры жирных кислот : щелочь – 1 : 1, температуре проведения процесса 40 °С, и заранее заданных объемных скоростях подачи реагентов в нейтрализатор, удалось снизить кислотное число рапсового мала с 3,5 до 1,9 мг КОН/г. Проведение процесса в этих условиях также позволило извлечь из базового рапсового масла почти 40 % неомыляемых веществ, массовая доля которых в масле составила 1,8 % по сравнению с базовым 2,9%. Все это привело к снижению температуры замерзания рапсового масла до минус 23 °С. Таким образом, проведенная обработка базового рапсового масла способствовала улучшению практически всех его физико-химических характеристик, и как следствие, улучшению комплекса свойств (вязкоупругих и вулканизационных характеристиках смесей) в протекторных резинах зимних нешипуемых (фрикционных) шин [3].

В таблице 2 приведены физико-химические показатели рапсового масла после его нейтрализации водным раствором гидроксида натрия. Таблица 2 - Характеристика рапсового масла 2-го сорта производства компании «АСТОН» после его обработки нейтрализацией водным раствором гидроксида натрия.

Данный образец был использован автором настоящей работы в дальнейших исследованиях для введения в резиновую смесь протекторного типа на основе комбинации 1,4-*цис*-изопренового и 1,4-*цис*-бутадиенового каучуков в качестве пластификатора. В качестве наполнителей в резиновой смеси использовалась комбинация активного печного техуглерода и кремнекислоты.

Физико-химические показатели рапсового масла								
Молярная масса, г/моль	Температура застывания, °С	Плотность при 20 °С, кг/м ³	Кислое число, мг КОН/г	Иодное число, не более гI ₂ /100 г	Температура вспышки, °С	Массовая доля несомлеяемых веществ, %, не более	Массовая доля жирных кислот в безводном продукте, %, не менее	Массовая доля воды, %
~882	Минус 23	922	1,9	124	220	1,8	97,2	следы

Список литературы:

1. Пояркова Т.Н. Использование отхода производства подсолнечного масла — соапстока для получения эмульгаторов при синтезе латекса / Т.Н. Пояркова, Г.В. Кудрина, Ю.И. Прокофьев, Е.В. Сотникова, Л.А. Корыстина // VIII Межрегиональная научно-практическая конференция: актуальные вопросы экологии. Воронеж: ВГУ, 2009 (24 мая). С.185.
2. Рыжкова С.М. Российский рынок масложировой продукции в условиях конкуренции / С.М. Рыжкова, В.М. Кручинина // Вестник ВГУИТ. 2016. №2. С.314-322.
3. Макаров С.В. Принципы экологии и ресурсосбережения в масложировой промышленности: учеб. пособие / С.В. Макаров, Н.В. Степычева, Т.Е. Никифорова // Иван. гос. хим.-тех. ун-т. Иваново, 2011. 240 с.
4. Волков И.М. Пластификаторы на основе продуктов растительного происхождения для эластомерных композиций / И.М. Волков, В.В. Соловьев, О.Ю. Соловьева // Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 18 апреля 2018 г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 1 [Электронный ресурс]. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. С.78-82.
5. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение. Л.: Химия, 1981. 304 с.
6. Плетнев М.Ю. Косметико-гигиенические моющие средства. М.: Химия, 1990. 272 с.
7. Селиванов С.Е. Утилизация отходов соапстоков / С.Е. Селиванов, М.И. Кулик. М.: Дрофа, 2008. 239 с.
8. Плесовских, В.А. Физико-химия и технология производства мыла / В.А. Плесовских, А.А. Безнадежных. М.: Пищепромиздат, 2001. 140 с.

9. Арутюнян Н.С. Рафинация жиров и масел. Теоретические основы, практика, технология, оборудование / Н.С. Арутюнян, Е.П. Корнена, Е.А. Нестеров / СПб.: ГИОРГ, 2004. 288 с.
10. Арутюнян Н.С. Лабораторный практикум по химии жиров. СПб.: ГИОРД, 2004. 264 с.
11. Горелова О.М. Исследование возможности переработки жиросодержащих отходов производства, растительных масел. О.М. Горелова, Н.И. Кравченко / Ползуновский вестник. 2015. №4. Т.1. С.68-72.

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Сапрыка А.В., д-р техн. наук, профессор,
Сингатулин Р.С., ст. преподаватель
*Белгородский государственный технологический
университет им В.Г. Шухова*

Аннотация. Проанализированы методы улучшения спектральных и динамических характеристик цифровых источников электромагнитных колебаний диэлькометрических систем, предназначенных для исследования биологических объектов в свободном пространстве.

Ключевые слова: спектральные характеристики, динамические характеристики, диэлькометр, биологический объект, источник электромагнитных колебаний.

Основной целью оптимального проектирования источников электромагнитных колебаний (ЭМК) для диэлькометрии биологических объектов является достижение минимального уровня помех в выходном спектре источника ЭМК в режиме синхронизма. Это необходимо обеспечить в условиях, когда в кольце обратной связи одновременно действуют внутренние помехи, возникающие в стабилизируемом автогенераторе, и внешние помехи, в основном, обусловленные комбинационными частотами от генератора эталонных частот. Подавление помех обоих видов можно обеспечить одновременно, однако в абсолютно устойчивой системе ФАП при заданной глубине подавления одних помех существует предел возможного подавления другими [1,2].

Проблема разрешения противоречий между динамическими и спектральными характеристиками систем синтеза частот является самой сложной задачей проектирования источников ЭМК диэлькометрической системы [3-5, 6].

Достижения компромисса между спектральными и динамическими характеристиками достигается различными методами и способами [3-5, 6-7].

Рассмотрим существующие в настоящее время методы улучшения спектральных и динамических характеристик цифровых источников ЭМК.

В [3] предложен метод расширения полосы захвата при сохранении фильтрующей способности источника ЭМК в установившемся режиме за счет предварительной установки генератора, управляемым напряжением (ГУН) вблизи требуемой номинальной частоты, как показано на рис. 1

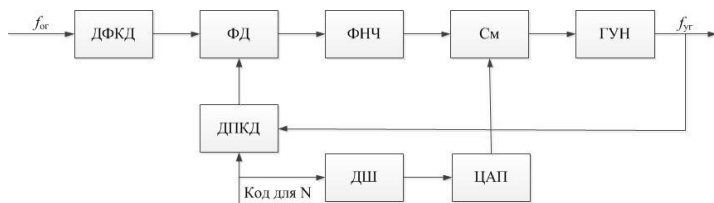


Рисунок 1 - Структурная схема источника ЭМК с предварительной установкой ГУН

В схему источника ЭМК вводится цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и дешифратор (ДШ). Диапазон перестройки ГУН делится на ряд диапазонов. Предустановка осуществляется путем подачи на второй вход сумматора напряжения подстройки с выхода ЦАП. При использовании фильтра нижних частот (ФНЧ) с большой инерционностью должна быть повышена точность предварительной установки, т.к. полоса захвата при этом резко сужается.

Развитие этого метода в [6] производится за счет введения автоматического выбора управляющих напряжений, как показано на рис. 2

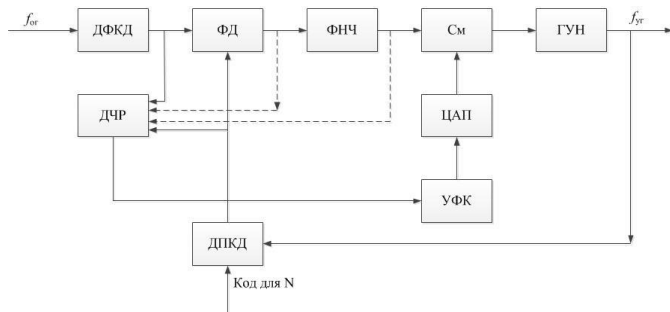


Рисунок 2 - Структурная схема источника ЭМК с устройством поиска

Для определения момента вхождения системы импульсно-фазовой автоматической подстройки частоты (ИФАПЧ) в указанный режим в схему вводится датчик частотного рассогласования (ДЧР). Штриховыми линиями обозначены возможные варианты подключения ДЧР. Для формирования закона изменения напряжения подстройки включается устройство формирования кода (УФК).

Напряжение подстройки можно осуществить, также подавая его на вход ФНЧ. Чтобы это осуществить, необходимо включить сумматор напряжений между фильтром и используемым в качестве дискриминатора ИФД. ФНЧ, в данном случае, выполняет дополнительную фильтрацию, что положительно влияет на спектральные характеристики источника ЭМК [6].

В [4] повышение быстродействия источника ЭМК достигается с помощью систем автоматического поиска частоты (АПЧ), использующий для уменьшения начального частотного рассогласования частотный детектор (рис. 3).

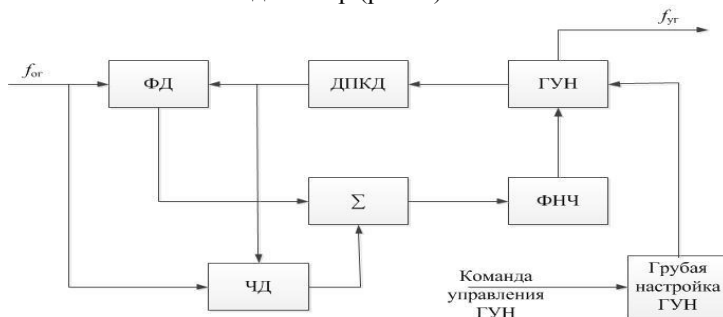


Рисунок 3 - Структурная схема двухкольцевой петли источника ЭМК

В этом случае режим захвата обеспечивается частотным детектором, напряжение на выходе которого падает до 0 сразу же после установления режима захвата по фазе. Далее в действие вступает фазовый дискриминатор и происходит захват частоты ГУН [4,6].

Обе эти функции могут быть совмещены в едином приборе, например, импульсным частотно-фазовым детекторе (ИЧФД).

Нарушение очередности поступления входных импульсов дискриминатора является критерием смены режима работы ИЧФД.

Повышение быстродействия достигается также использованием многокольцевых ИФАПЧ [4,5].

На рис. 4 приведена двухкольцевая схема источника ЭМК.

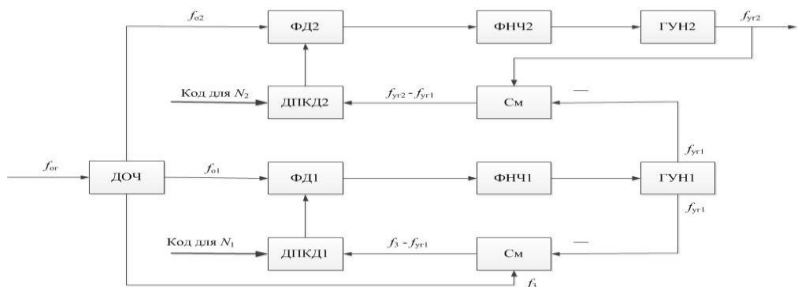


Рисунок 4 - Структурная схема двухкольцевого источника ЭМК

Выходная частота источника ЭМК определяется соотношением [6]

$$f_{УГ2} = f_3 - N_1 f_{01} + N_2 f_{02}$$

где f_{01}, f_{02} – частоты сравнения первого и второго колец ИФАПЧ;

f_3 частота подставки, вырабатываемая датчиком опорных частот (ДОЧ).

Выполнить перестройку $f_{УГ}$ на величину $F_{Ш} = f_{02} - f_{01}$ можно благодаря изменению на единицу N_1 и N_2 . Комбинационные составляющие на выходах смесителей фильтруются кольцом ИФАПЧ при верном выборе частотного режима.

Расширение полосы захвата при сохранении высокой фильтрующей способности источника ЭМК возможно также за счет непосредственного изменения характеристик канала управления кольца ФАПЧ в режиме захвата.

В [3] расширение полосы захвата осуществлено за счет изменения коэффициента усиления петли ФАПЧ. На рис. 5 приведена структурная схема источника ЭМК, в которой для этого в цепь управления ГУН введен регулируемый усилитель постоянного тока (УПТ). Такой же усилитель может быть введен между выходом дискриминатора и входом ФНЧ с целью изменения коэффициента передачи детектора в переходном режиме. Управление коэффициентом усиления УПТ осуществляется при переключении частот источника ЭМК.

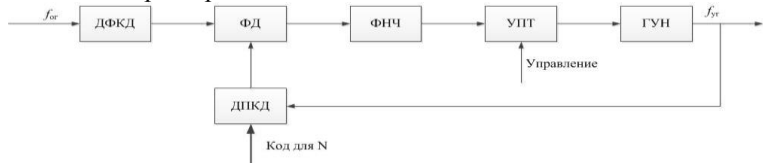


Рисунок 5 - Структурная схема источника ЭМК с изменяемым коэффициентом усиления в цепи управления ГУН

Повышение быстродействия в цифровом источнике ЭМК также достигается за счет включения делителя с дробным коэффициентом деления (ДДПКД) вместо ДПКД [7]. Однако улучшение динамических характеристик источника ЭМК возможно в случае, если приняты меры по снижению так называемых «помех дробности» [7].

В результате проведенного анализа методов улучшения спектральных и динамических характеристик цифровых источников ЭМК диэлькометрических систем можно сделать следующие вывод: существующие методы и способы не обеспечивают в полной мере необходимый компромисс между спектральными и динамическими характеристиками источника ЭМК для высокоточных измерений диэлькометрии биологических объектов.

Список литературы:

1. Сапрыка, А.В. Анализ методов и технических средств для дистанционного измерения диэлектрических параметров в биологических объектах / А.В. Сапрыка, Р.С. Сингагулин // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2018. – №1(17). С.59-67.
2. Галин, А. С. Диапазонно-кварцевая стабилизация СВЧ / Галин А. С. – М.: Связь, 1976. – 256 с.
3. Шапиро, Д. Н. Основы теории синтеза частот / Д. Н. Шапиро, А. А. Паин. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
4. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / 2-е издание. Под ред. В. В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь, 1989. – 230 с.
5. Левин, Б. А. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки / Б. А. Левин, В. Н. Малиновский, С. К. Романов. – М.: Радио и связь, 1989. – 232 с.
6. Шахгильдян, В. В. Системы фазовой автоподстройки с элементами дискретизации / В. В. Шахгильдян, А. А. Ляховкин // – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
7. Варфоломеев, Г. Ф. Спектр помех дробности в системе фазовой АПЧ с дробным делителем частоты / Г. Ф. Варфоломеев // Техника средств связи. Сер. ТРС. – 1978. – Вып. 10. – С. 66 – 71.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С ГУСЕНИЧНЫМ ШАССИ

Степовой А.А., ассистент,

Медведев А.М., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Аннотация. В данной статье рассматривается задача управления мобильным роботом, снятие кривых разгона его двигателей для идентификации и нахождения их передаточных функций с целью настройки программных ПИ регуляторов и использование датчика абсолютной ориентации для поддержания движения мобильного робота по заданному курсу. Приведены блок-схема работы и принципиальная электрическая схема системы управления мобильным роботом.

Ключевые слова: мобильный робот, система управления.

Большое разнообразие робототехнических устройств и огромное количество задач, которые должны решать роботы сегодня, приводит исследователей к необходимости создавать математические модели роботов и их отдельных узлов для построения систем управления такими устройствами.

Для создания системы управления был построен мобильный робот на основе гусеничного шасси Dagu Rover 5 с двумя электродвигателями с встроенными квадратурными инкрементальными энкодерами. В качестве устройства управления мобильным роботом была выбрана плата Arduino Mega 2560 [1]. Для управления двигателями имеется драйвер L298HN, установленный на Motor Shield.

Для получения сигналов с энкодеров используется интегральная микросхема K155ЛП5, реализующая логическую функцию XOR. В обработчике прерывания по фронту и спаду считываются сигналы, полученные с указанной микросхемы и ведется подсчет полученных импульсов на основе которых рассчитывается скорость движения платформы. Схема подключения K155ЛП5 представлена на рисунке 1.

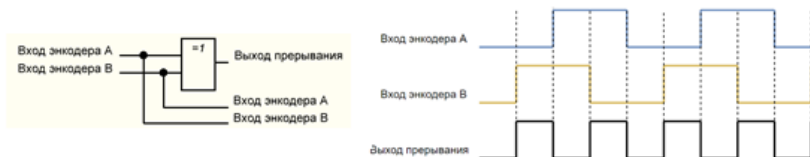


Рисунок 1 - Подключение K155ЛП5

Для поддержания заданного курса используется датчик абсолютного положения BNO 055. Данный датчик имеет необходимые функционал для решения задачи: акселерометр, гироскоп и магнитометр [2]. Также у него имеется встроенный контроллер, который сразу обрабатывает полученные данные и выдает текущее положение в виде углов Эйлера, что не расходует процессорное время основного устройства управления. Принципиальная электрическая схема соединений мобильного робота представлена ниже на рисунке 2.

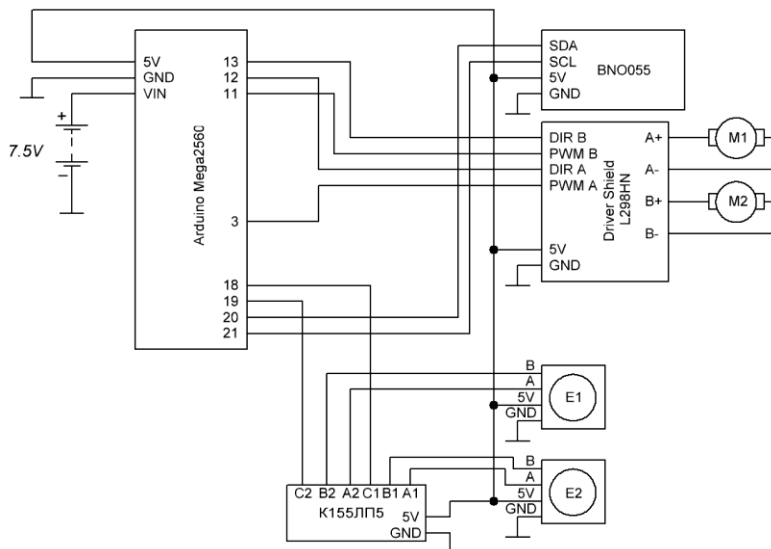


Рисунок 2 - Принципиальная электрическая схема соединений мобильного робота

Для возможности поддержания заданной скорости движения и компенсации различных характеристик левого и правого двигателей были созданы программные ПИ регуляторы. С целью подбора их коэффициентов были сняты кривые разгона для левого и правого двигателя (рис. 3) и проведена идентификация. К графику разгонной характеристики была проведена касательная, задан устойчивый уровень, являющийся коэффициентом усиления k , получена постоянная времени

T и запаздывание τ . Полученные передаточные функции W_L и W_{II} имеют вид: $W_L = \frac{0.23}{0.109s+1} \cdot e^{-0.016s}$, $W_{II} = \frac{0.205}{0.084s+1} \cdot e^{-0.033s}$.

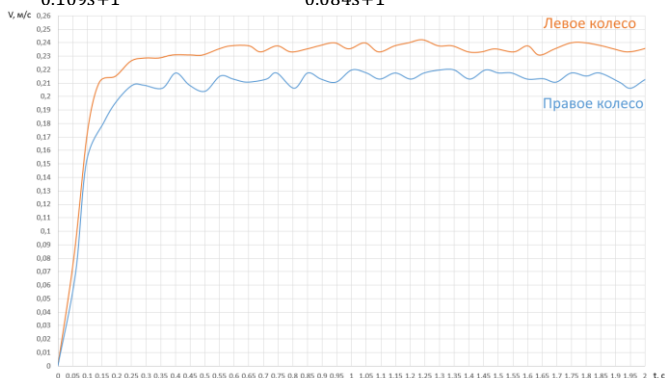


Рисунок 3 - Кривые разгона без регуляторов

С использованием средств Matlab [3] были подобраны коэффициенты для ПИ регуляторов, где $k_{pL} = 5.308$, $k_{iL} = 49.819$, $k_{pII} = 4.276$, $k_{iII} = 52.563$, что дало стабильную работу обоих двигателей, которую можно наблюдать на рисунке 4.

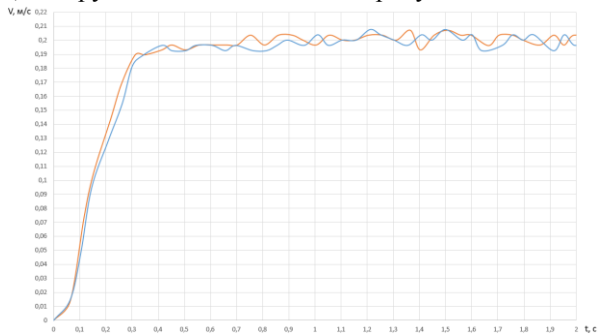


Рисунок 4 - Кривые разгона с использованием ПИ регуляторов

Поддержание установленного вектора движения реализовано с помощью датчика абсолютного положения ВНО 055 и ПИД регулятора, на вход которого подается разность текущего угла поворота робота и желаемого. Выходом регулятора является число, на которое необходимо уменьшить уставку ПИ регулятора соответствующего двигателя в зависимости от направления поворота. Такой способ управления позволяет поддерживать заданный курс движения. При возникновении

необходимости поворота на углы больше чем 60 градусов, используется разворот на месте с помощью разнонаправленного движения гусениц.

Блок-схема работы алгоритма движения по заданному курсу представлена на рисунке 5.

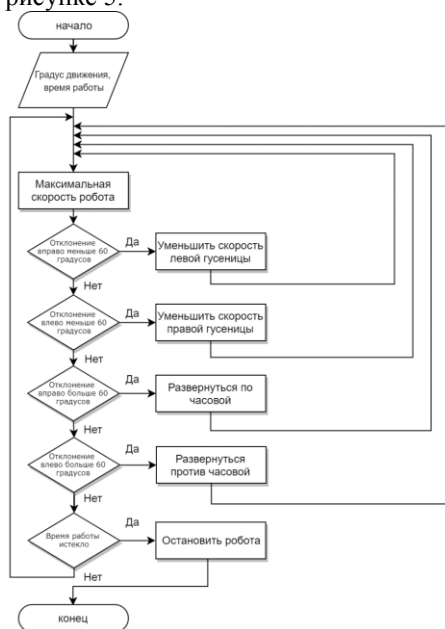


Рисунок 5 - Блок-схема работы алгоритма движения по заданному курсу

В рамках данной работы был построен мобильный робот на основе гусеничной платформы с системой управления, позволяющей осуществлять движение с заданной скоростью и направлением.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6.

Список литературы:

1. Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino. СПб.: БХВ - Петербург, 2012. 256 с.
2. Сайдов П.И. Теория гироскопов. Часть 1. М.: Высшая школа, 1965. 472с.
3. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления: пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА ПРИ КОНТУРНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА

Трушин Н.Н., д-р техн. наук, профессор,
Лисицин В.Н., аспирант
Тулский государственный университет

Аннотация. Рассматриваются стойкостные испытания концевых твердосплавных монолитных фрез малого диаметра при контурном фрезеровании заготовок печатных плат из листового стеклотекстолита марки СОНФМ. Экспериментально определены эффективные значения подачи фрезы и скорости резания, получена формула для расчета стойкости фрезы.

Ключевые слова: стеклотекстолит, концевая фреза, контурное фрезерование, скорость резания, износ инструмента, стойкость.

Печатные платы являются одним из основных компонентов радиоэлектронной аппаратуры самого широкого назначения. Печатные платы обычно изготавливаются из фольгированного стеклотекстолита [1, 2]. Основными операциями обработки резанием заготовок печатных плат на металлорежущих станках являются сверлильная и фрезерная. Печатные платы со сложными контурами изготавливаются преимущественно методом контурного фрезерования концевыми фрезами [3, 4].

Фрезерная обработка стеклотекстолита является относительно малоизученным процессом, несмотря на наличие в технической литературе рекомендаций по назначению режимов резания [5, 6]. Это обстоятельство объясняется широким спектром марок стеклотекстолита отечественного и зарубежного производства. Стеклотекстолиты относятся к композитным материалам и обладают повышенной твердостью, что приводит к интенсивному износу режущей части инструмента [7-9].

В производственных экспериментах использовался отечественный фольгированный стеклотекстолит марки СОНФМ [10]. Стеклотекстолит СОНФМ представляет собой слоистый прессованный материал, изготовленный из стеклоткани, пропитанной связующим веществом на основе эпоксидных смол и отвердителей. Фольгированный стеклотекстолит облицовывается с одной или двух сторон медной электролитической фольгой толщиной от 18 до 105 мкм.

В качестве режущего инструмента в экспериментах использовалась концевая фреза типа CBD диаметром 2,5 мм, представляющая собой

монолитную конструкцию из твёрдого сплава типа ВК6 (по каталогу российской компании "Остек-сервис-технология") [11]. Контурное фрезерование листовых заготовок проводилось на специальном станке Schmolл MX с системой ЧПУ Exellon CNC-7 [12].

Фрезы CBD (рис. 1) с относительно малым зубом и с большими винтовыми стружечными каналами обеспечивают чистовое фрезерование контуров и пазов, за счет малой вибрации, передаваемой от заготовки к шпинделю. Винтовые режущие кромки фрез CBD снабжены также стружколомающими элементами. Поскольку фрезерование стеклотекстолита происходит без смазочно-охлаждающих средств, то отвод тепла из зоны резания происходит с помощью двух воздушных потоков: один воздушный поток создаётся от вращающегося шпинделя, а другой воздушный поток создаёт штатное устройство станка для отвода мелкой стружки из зоны резания. Кроме этого, слой фольги на стеклотекстолите тоже обеспечивает дополнительное рассеивание тепла с поверхности заготовки.

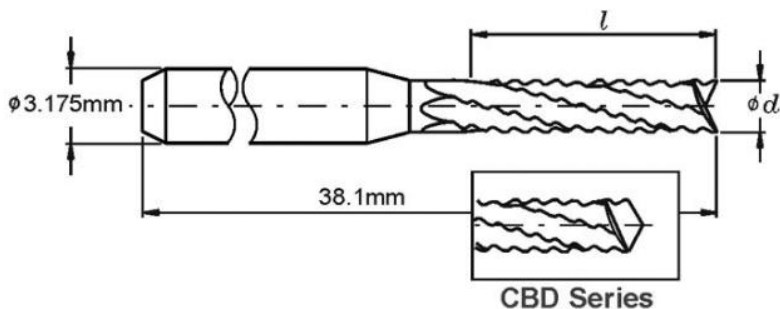


Рисунок 1 – Концевые фрезы типа CBF и CBD [11]

В экспериментах использовался пакет из трёх стеклотекстолитовых пластин. Обрабатываемая стеклотекстолитовая пластина толщиной 2 мм размещалась между двумя вспомогательными пластинами-прокладками из стеклотекстолита СОНФМ толщиной 1 мм. Таким образом, суммарная толщина обрабатываемого пакета составляла 4 мм. Необходимость использования нижней прокладки является обеспечением гарантированного зазора между инструментом и столом станка. Глубина резания в экспериментальных проходах составляла 1

мм. Изучение состояния фрез после пробных проходов осуществлялось с помощью лазерного измерительного оборудования DMG MORI.

Ранее выполненные исследования показали, что для фрезерования стеклотекстолита необходим тщательный выбор оптимальной скорости подачи, чтобы предотвратить появление дефектов на обработанных поверхностях. Более подробно анализ и классификация дефектов, возникающих в процессе фрезерования стеклотекстолита различных марок, представлены в работах [13-15].

В таблице 2 представлены параметры и результаты экспериментов. Скорость резания и скорость подачи рассчитывались по классическим формулам (1) и (2):

$$n = 1000V / \pi D, \quad (1)$$

где n - частота вращения шпинделя, мин⁻¹; V - скорость резания, м/мин; D - диаметр фрезы, мм;

$$S_m = S_z z n, \quad (2)$$

где S_m - подача, м/мин; S_z - подача, мм/зуб; z - число зубьев фрезы.

Таблица 2 - Режимы резания для экспериментального исследования

№ п/п	Обороты шпинделя, тыс. мин ⁻¹	Подача фрезы, м/мин	Время обработки, мин.	Износ инструмента, мкм
1.	33	1,4	10	15
2.	33	0,6	10	12
3.	24	1,0	10	4
4.	30	1,4	10	10
5.	30	1,0	10	8
6.	24	1,0	44	15

По результатам экспериментов было установлено, что для фрезы типа CVD диаметром 2,5 мм при толщине обрабатываемого стеклотекстолитового пакета 4 мм и подаче 1 м/мин оптимальная скорость резания составляет 188 м/мин. Установленные режимы резания обеспечивают шероховатость $R_a=40$ мкм, что соответствует

рекомендациям стандарта ОСТ 3-1291-82. на выбор шероховатости поверхности.

После станочных экспериментов была определена функциональная зависимость стойкости инструмента от режимов резания. Исходная формула для стойкости инструмента:

$$T = \frac{C_v}{V^x S^y b^z h^l}, \quad (3)$$

где T – стойкость инструмента, мин; C_v – поправочный коэффициент; V – скорость резания, м/мин; S – подача, м/мин; b – ширина резания, мм; h – диаметральная величина износа режущих кромок, мм; x, y, z, l – показатели степени (коэффициенты).

Уравнение (3) было приведено к линейной логарифмической форме:

$$\ln T = \ln C_v - x \ln V - y \ln S - z \ln b - l \ln h, \quad (4)$$

$$\ln C_v = w, \quad (5)$$

$$\ln T = w - x \ln V - y \ln S - z \ln b - l \ln h. \quad (6)$$

Для нахождения поправочных коэффициентов система уравнений решалась с помощью ПО Mathcad.

Параметр C_v рассчитывался путем обратного логарифмирования и подстановкой полученных коэффициентов в формулу (3):

$$C_v = e^w, \quad (7)$$

$$T = \frac{7.29}{V^{-10.031} S^{-0.896} b^{-41.754} h^{1.368}}. \quad (8)$$

Формула (8) представляет собой формулу для расчёта стойкости концевой фрезы типа CBD в зависимости от режимов обработки стеклотекстолита СОНФМ и предельного износа режущей части фрезы. Результаты экспериментов используются в производственной практике технологического подразделения АО КБП (г. Тула).

Список литературы:

1. Гормаков А.Н., Воронина Н.А. Конструирование и технология электронных устройств и приборов. Печатные платы. Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 164 с.
2. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005. 304 с.

3. Крылов В.П. Технологии и подготовка производства печатных плат. Учебное пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2006. 64 с.
4. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. Учебник. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. 560 с.
5. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов. Учебное пособие / Калининград: Калинингр. ун-т, 2000. 448 с.
6. Штучный Б.П. Механическая обработка пластмасс. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.
7. Ильин В.А. Технология изготовления печатных плат. Л.: Машиностроение, 1984. 77 с.
8. Махмудов М. Механическая обработка печатных плат. М.: Радио и связь, 1986. 72 с.
9. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник ЮУрГУ. Серия "Машиностроение". 2015. Т.15. №1. С.35-46.
10. ТУ 2296-001-40230483-01. Стеклотекстолит нормированной горючести фольгированный модифицированный СОНФМ. – ЗАО "Изолит", 2001. 25 с.
11. Каталог расходных материалов и инструментов фирмы "Остэк". URL: <http://www.ostec-st.ru/catalog/equipment/frezy-i-svyerla/sbf-freza-s-malym-zubom-i-bolshim-struzhechnym-kanalom-vershina-frezy-lastochkin-khvorost/> (дата обращения 27.01.19).
12. Каталог оборудования и инструментов фирмы Schmolz. URL: <http://www.schmolz-maschinen.de/en/applications.html> (дата обращения 27.01.19).
13. N N Trushin, V N Lisitsin. Experimental study of fiber-glass plastic work pieces contour milling. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042110 doi:10.1088/1757-899X/327/4/042110.
14. Лисицин В.Н., Трушин Н.Н. Качество поверхности листового стеклотекстолита после контурного фрезерования // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С.76-84.
15. Лисицин В.Н., Трушин Н.Н. Исследование процесса фрезерования стеклотекстолита марки СОНФМ концевой фрезой типа CBD // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2018. С.403-410.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ IGBT ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Чернышов Н.Н., канд. техн. наук, доцент,
Сапрыка В.А., ассистент,
Бердников М.Н., студент,
Нивин А.И., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им В.Г. Шухова*

Аннотация. Рассмотрена система предельно допустимых параметров ключа, которая объединяет граничные значения напряжений и токов для входной и выходной цепи прибора, предельно допустимые температуры переходов и максимально возможную рассеиваемую мощность.

Ключевые слова: предельно допустимые параметры, рассеиваемая мощность, полупроводниковые приборы, рабочая точка, режим токовой перегрузки, сверхтоки и перенапряжения.

Система предельно допустимых параметров ключа объединяет граничные значения напряжений и токов для входной и выходной цепи прибора, предельно допустимые температуры переходов и максимально возможную рассеиваемую мощность. Абсолютный предел напряжения определяется пробоем в структуре прибора: увеличение объемного заряда, лавинный и поверхностный пробой. В современных силовых ключах определяющим является лавинный пробой, приводящий к неконтролируемому процессу умножения носителей заряда. В силовых ключах допустимые токи устанавливаются в соответствии с допустимой температурой переходов, конструктивных особенностей, определяемых надежностью выводов и контактов, а также допустимыми пределами изменения усилительных свойств, которые не должны ухудшаться при заданной токовой нагрузке [1]. Максимальная температура переходов ключа и максимальная температура его корпуса определяются свойствами исходного материала, особенностями структуры переходов и конструкции. Для IGBT и транзисторов со статической индукцией максимально допустимая температура несколько больше, чем для мощных MOSFET. Нижний температурный предел работы ключа устанавливается с учетом недопущения нарушения конструкции прибора ограничивается величиной – 40... – 60°C. Максимальная рассеиваемая мощность определяется тепловым сопротивлением ключа, которое связывает данный параметр с максимально допустимой

температурой перехода. Предельные возможности силовых ключей наглядно представляются диаграммами области безопасной работы (ОБР), называемых также областью максимальных режимов (ОМР). Границы ОБР определяются предельными значениями выходного тока, напряжения, максимальной рассеиваемой мощностью и допустимой температурой перехода [2]. Различают прямо смещенную ОБР (ПОБР, FBSOA – Forward Bias SOA), то есть в режиме эксплуатации с положительным смещением во входной цепи ключа, обратную ОБР (RBSOA – Reverse Bias SOA) с отрицательным входным смещением, а также ОБР в режиме токовой перегрузки (SCSOA – Short Circuit SOA). Прямо смещенные ОБР IGBT приведены на рис.1. Для безопасности работы силовых ключей при выключении используется обратная ОБР.

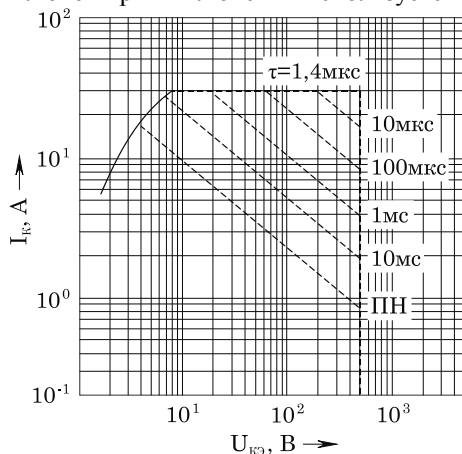


Рисунок 1 - Прямо смещенная ОБР IGBT

При выключении IGBT необходимо исключить триггерный эффект в структуре транзистора, поскольку остаточный ток присутствует при переходном процессе и определяется рекомбинацией дырок. Сверхтоки и перенапряжения – токи и напряжения 3-го порядка и выше возникают как при штатных режимах работы устройства, так и при аварийных ситуациях. Причинами их возникновения является: несовершенство схмотехнического исполнения силового каскада, неучтенный при разработке тепловой дрейф параметров, наличие недемпфированных элементов, неисправности или не налаженная работа схемы управления, неверно рассчитанные либо выполненные сопряженные элементы [3-5].

Применение цепей, формирующих траекторию изменения рабочей точки транзистора в процессах переключения, позволяет снизить потери мощности в силовом ключе, а также исключить, либо минимизировать паразитные всплески токов и напряжений. Наиболее обобщающим примером, демонстрирующим методы построения данных цепей, можно рассматривать на примере работы транзисторного ключа на индуктивную нагрузку в режиме непрерывных токов (рис.2).

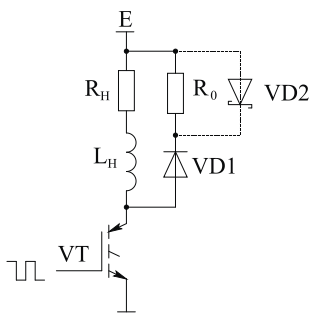


Рисунок 2 - Силовой ключ с индуктивной нагрузкой

Импульс тока в переходном процессе включения обусловлен процессом восстановления запирающих свойств шунтирующего диода. В переходном процессе выключения наблюдается всплеск напряжения на транзисторе, который связан с конечным временем включения шунтирующего диода и паразитными индуктивностями. Спад тока при этом происходит при выходном напряжении равном напряжению питания. Таким образом, мгновенные значения выделяющейся в транзисторе мощности и при включении, и при выключении достаточно велики. Траектория рабочей точки ключа для данного режима переключения показана на рис.3. Для увеличения фронта нарастания напряжения при выключении IGBT используют параллельную емкость с дополнительным диодом и резистором [6].

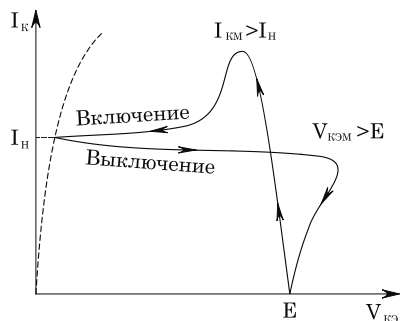


Рисунок 3 - Траектория перемещения рабочей точки транзистора при работе на индуктивную нагрузку

Резистор предназначен для ограничения сброса энергии, запасаемой в защитном конденсаторе, в транзистор при его включении шунтируется диодом. Чем больше величина защитной емкости, тем длиннее фронт нарастания напряжения на ключе при запираии. Величина C_0 при этом не оказывает влияния на фронт спада тока. Наиболее оптимальные номиналы величин L_0 и C_0 могут быть определены при помощи эмпирически определенных формул, учитывающих величины коммутируемого тока, удерживаемого напряжения, а также параметры самих транзисторов

$$L_0 \approx 0,22 \frac{E \times t_{d(on)}}{I_K}, \quad (1)$$

$$C_0 \approx 0,22 \frac{I_K \times t_{d(off)}}{E}, \quad (2)$$

где I_K – непрерывный коммутируемый ток; $t_{d(on)}$ – время фронта нарастания импульса; $t_{d(off)}$ – длительность фронта спада тока; E – удерживаемое напряжение.

Таким образом, правильное применение защитных цепей позволит не только обеспечить безопасную траекторию переключения, но и уменьшает общие потери, рационально перераспределяя их между транзистором и дополнительными элементами. Мощность потерь в резисторе определяется энергией, запасаемой в защитной индуктивности L_0 и конденсаторе C_0 , соответственно в открытом и закрытом состоянии ключа [7]

$$P_0 = \frac{1}{2} (L_0 I_K^2 + C_0 E^2) f, \quad (3)$$

где f – частота коммутации.

Величина R_0 выбирается из условий полного разряда конденсатора C_0 при включении транзистора и уменьшения до нулевого значения тока в индуктивности L_0 при выключении. Эти условия обеспечиваются, если постоянные времени R_0C_0 и L_0/R_0 в несколько раз меньше интервалов включенного и выключенного транзистора. Как следует из выше указанного уравнения, рассеиваемая мощность пропорциональна частоте переключения транзистора. На относительно высоких частотах эти потери могут стать ограничивающим фактором применения рассмотренных цепей защиты. По этой причине более выгодно использовать схемы, в которых запасаемая в защитных элементах энергия либо возвращается в источник питания (рекуперировается).

Основными источниками потерь при сверхтоках являются [8]:

– Сквозной ток в паре транзисторов мостовой схемы. Транзисторы VT1 и VT2 не успевают выключиться полностью до того момента, как пара транзисторов VT3 и VT4 начинает открываться. Причиной этого является наличие паразитных параметров самих транзисторов, а также инерционность схемы управления. Это приводит к тому, что затворные характеристики парных транзисторов пересекаются по уровню V_{GE} , которое в случае превышения величины порогового $V_{GE(th)}$ приводит к тому, что все транзисторы оказываются одновременно открытыми.

– Сквозной ток в паре транзистор-рекуперационный диод. Причиной возникновения сверхтока является наличие инверсной проводимости у диода. Например, по причине неверно рассчитанного напряжения в третьем квадранте ВАХ. Влиянию такого вида сверхтоков подвержены промышленные преобразователи напряжения мощностью до 10 кВт.

– Сверхток, возникающий при наличии емкостных фильтров в цепях трансформаторно-выпрямительных блоков. Причины возникновения – малая индуктивность рассеяния обмотки трансформатора, которая работает через выпрямительный блок трансформатора и содержит емкость C вместо ограничительного дросселя на выходе выпрямителя.

– Сверхток, возникающий вследствие инверсной проводимости предварительного выпрямителя с индуктивным фильтром. Причина возникновения аналогична причине в паре транзистор-рекуперационный диод. Однако, в этом случае влиянию сверхтока подвержены цепи первичной и вторичной обмотки трансформатора.

Основными источниками потерь при перенапряжении являются [9]:

– Перенапряжение при выключении индуктивно-активной цепи. Возникает под действием самоиндукции, когда в качестве нагрузки транзисторного каскада применяется реактивный индуктивный элемент;

– Перенапряжение на транзисторе, возникающее в результате выключения трансформаторно-активной нагрузки под действием самоиндукции первичной обмотки трансформатора. Одними из примеров устройств, для которого может быть характерен данный вид перенапряжения силовых ключей являются сварочные инверторы. В них имеет место резкий разрыв тока при разрыве сварочной дуги;

– Перенапряжение на диодах при включении транзистора в цепь демпфирующий дроссель возникает после запираания замыкающего диода в схемах на 1 кВт с наличием единого транзистора верхнего плеча;

– Перенапряжение на диодах в цепи вторичной обмотки. Возникает за счет самоиндукции вторичной обмотки трансформатора.

Главной особенностью применения ключевых приборов в устройствах управления электродвигателями является их способность выдерживать большие напряжения и токи, зачастую действующие одновременно. Это может приводить к уходу режима работы силового ключа за пределы границ области безопасной работы, если не обеспечить достаточного запаса по предельным параметрам. Другая особенность применения заключается в действии на ключ высокого уровня помех, способных приводить к ложному срабатыванию. Обмотка асинхронного электродвигателя представляет собой R-L-нагрузку. Для управления скоростью вращения двигателя изменяют частоту источника питания, при этом изменяется индуктивное сопротивление обмотки питания [10-12]. Чтобы поддерживать значение тока обмотки на постоянном уровне для сохранения вращающего момента, используют соответствующее регулирование выходного напряжения от частоты. Нарушение линейности регулировки вызывает изменение вращающего момента. При этом резкое уменьшение скорости двигателя может вызвать увеличение тока возбуждения и вращающего момента, что в свою очередь может привести к насыщению поля в обмотке питания и повреждению электродвигателя или перегрузке силовых ключей. Скорость асинхронного двигателя почти не зависит от его нагрузки, а значит, от вращающего момента вплоть до критических значений, при которых возникает эффект скольжения (рис. 4). Это может привести к потере скорости и увеличению тока ключа при одновременно высоком напряжении. Таким образом, для управления асинхронным электродвигателем более всего

подходит схема инвертора напряжения, построенная на основе полностью управляемых мощных ключевых приборов IGBT, а также МСТ, GTO и их разновидности, способных выдерживать большие токовые перегрузки [12-15]. Данный инвертор должен преобразовывать энергию источника постоянного тока в энергию сигнала переменной частоты с НЧ гармоническим составом и регулируемым выходным напряжением, и частотой. Выполнение этих требований обеспечивает применение инверторов напряжения с ШИМ.

Скорость вращения ротора

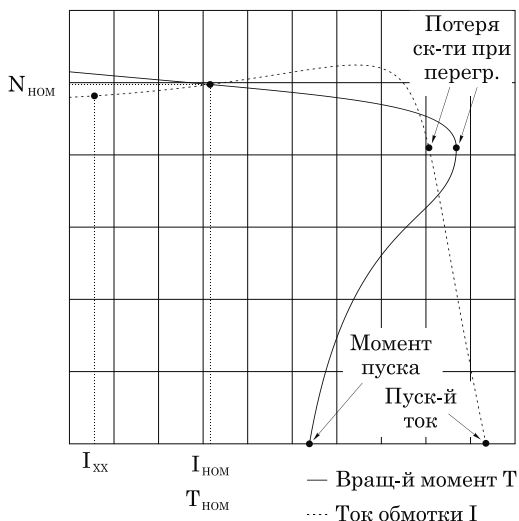


Рисунок 4 - Зависимость скорости от вращающего момента и тока в обмотке для асинхронного электродвигателя

Общепринятой является конфигурация автономного инвертора со звеном постоянного тока (VWF-инвертор). Эта схема содержит входной неуправляемый выпрямитель, емкостной фильтр трехфазный мостовой инвертор (рис. 5). Мостовое соединение ключей позволяет получать двух полярное напряжение на обмотке электродвигателя. Индуктивный характер нагрузки учитывается подключением к основным ключам встречно-параллельных диодов, обеспечивающих непрерывность тока в обмотке при отключении ее от источника и возврат запасенной магнитной энергии в конденсатор фильтра [15-18].

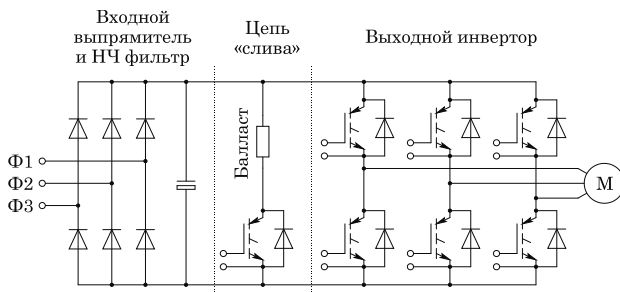


Рисунок 5 - Автономный инвертор напряжения со звеном постоянного тока

Введение в схемы силовых каскадов IGBT и MOSFET комплексов для регулирования траектории рабочей точки, позволяют решать следующие задачи: уменьшение, или полное устранение всплесков тока при включении и всплесков напряжения при выключении транзистора; ограничение di/dt при включении и dV/dt при выключении транзистора; ограничение значений коммутационного тока и напряжения по ОБР; разделение тепловыделения между транзистором и вводимым в силовой каскад дополнительными элементами; снижение потерь при работе устройства в целом; повышение электромагнитной совместимости устройств; снижение уровня помех. Практическое значение статьи заключается в обосновании введения снабберных цепей, простых в исполнении, которые могут решать задачу снижения динамических потерь при коммутации в широком спектре устройств.

Список литературы:

1. Hierholzer M. Application of High Power IGBT Modules // Nürnberg, Proc. Power Electronics /PCIM, 1996. – P.600-607.
2. Arai K., Iwasa T. Development of New Concept PKG Third Generation IGBT Module U Series // Nürnberg, Proc. Power Electronics /PCIM, 1996. – P.35-45.
3. Constapel R., Korec J., Baliga B.J. Trench-IGBTs with Integrated Diverter Structures // Yokohama, Proc./ ISPSD, 1995. – P.201-206.
4. Practical Considerations In High Performance MOSFET, IGBT and MCT gate drive circuits // Application Note / Texas Instruments. 1999. – P.16.
5. Hierholzer M., Brunner H. Characteristics of High Voltage IGBT Modules // Nürnberg, Proc. Power Electronics / PCIM, 1995. – P.135-138.
6. Hertrich H., Reinmuth K. HITFET-A New Generation of Intelligent Low Side Switches // Nürnberg, Proc. Power Electronics /PCIM, 1995. – P.9-15.

7. F. Blaabjerg, J.K. Pedersen. Comparison of NPT and PT IGBT-devices for hard switching applications in Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol.2,1994, – P.1174 –1181.
8. Gerstenmaier Y.C., Scheller G. Short Circuit Ruggedness, Switching and Stationary Behaviour of New High Voltage IGBT in Measurement and Simulation // EPE, Sevilla, Proc., Vol.1, 1995. – P.583-588.
9. Сидоров И.Н. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники // Справочник. М.: Радио и связь, 1989. – С.384.
10. А. Миронов. Магнитные материалы и магнитопроводы для импульсных источников питания // Радио, №6, 2000. – С.53-54.
11. Githiar A.N. A Comparison of IGBT Models for Use in Circuit Design // PESC, St. Louis, Proc., Vol. 2,1997. – P.1554-1560.
12. IGBT Modules Application note // The 5-th Generation CSTBT IGBT Chip use 12NF/24NF/24A Series / MITSUBISHI ELECTRIC,2007. – 77p.
13. Хансаа А. Гази Алькасра, Чернышов Н.Н., Слипченко Н.И., Писаренко В.М., М. Алкхавалдекс, Умяров К.Т., Башлий С.Ю., Сергеев П.Ю. Расчет потерь в резонансных преобразователях при режимах непрерывных и разрывных токов // Радиотехника /Всеукраинский сборник; №183, ХНУРЭ, 2015. – С.16-20.
14. Чернышов Н.Н., Умяров К.Т., Хансаа А. Гази Алькасра. Исследование динамических потерь на IGBT транзисторах при работе силовых каскадов на индукционную нагрузку // Applied radioelectronics; v.13, №4 / Academy of sciences of applied radioelectronics, 2014. – С.440-443.
15. Khansaa A. Ghazi, Chernyshov N.N., Pisarenko V.M., Umyarov K.T. Studying physical processes in crystals without inversion centre // Radioelectronics& informatics; №3, KhNURE, 2014. – P.11-14.
16. Чернышов Н.Н., Хансаа А. Гази Алькасра, Писаренко Д.В. Исследование физических процессов в IGBT транзисторах при высокочастотном преобразовании электрической энергии // VIIМіжнародна наукова конференція “Фізичні явища в твердих тілах” / ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2015. – С.160.
17. Чернышов Н.Н., Хансаа А. Гази Алькасра, Слюсаренко А.А. Исследование резонансных инверторов электроэнергии при непрерывных и разрывных токах // Zbior artykulow naukowych / Inzynieria i technologia. Nauka wczoraj, dzis, jutro. Warszawa, 28.02.2016. – С.16-20.
18. Чернышов Н.Н., Гордиенко Ю.Е., Писаренко В.М., Хансаа А. Гази Алькасра, Умяров К.Т. Математический анализ динамических потерь на IGBT транзисторах и методов их снижения // Радиотехника / Всеукраинский сборник; №180, ХНУРЭ, 2015. – С.72-75.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА IGBT ТРАНЗИСТОРАХ ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ COMSOL MULTIPHYSIC-5.2

Чернышов Н.Н., канд. техн. наук, доцент,
Салманов В.П., студент,
Гребенников М.В. студент,
Смирнов К.Л., студент

Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова

Аннотация. На основании условий работы IGBT рассмотрены методы снижения потерь при жесткой коммутации и постоянной величине напряжения питания.

Ключевые слова: рабочая точки, коммутационные процессы, силовой каскад, схемотехнические комплексы, область безопасной работы, генерация переходных процессов, уравнения колебательных контуров.

Целью научной статьи является исследование различных вариантов схем формирования траектории перемещения рабочей точки, и анализ возможности применения схем для коммутации больших токов и малых напряжений, малых токов и больших напряжений. Наиболее оптимальным решением задачи формирования траектории рабочей точки транзистора при коммутационных процессах является введение в схему силового каскада дополнительных схемотехнических комплексов. Они обеспечивают состояния dI/dt при включении, и dV/dt при выключении, при которых мгновенные значения тока и напряжения на транзисторе не выходят за пределы области безопасной работы. Для случая демпфирования колебательного контура использованы снабберы. Формы генераций переходных процессов могут быть различными. Поэтому при расчете коммутационных потерь возникают определенные сложности. Однако в большинстве случаев генерации могут быть описаны так же, как и переходные процессы при коммутации LC-цепей, с аналогичными параметрами и свойствами.

Практическое значение статьи заключается в исследовании форм напряжений и токов при коммутационных процессах. Для этого использованы на основании уравнения колебательных контуров в зависимости от их схемотехники и особенностей элементов, входящих в их состав. Программным комплексом Comsol Multiphysic-5.2 сделано

расчет концентрации электрических зарядов, легирующей примеси и распределение электрического потенциала в IGBT.

Суммарные потери мощности складываются из статических потерь, динамических потерь и потерь управления. Основная доля потерь приходится на статические потери и динамические потери. Потери на транзисторе в открытом состоянии ($P_{FW/T}$) определяются следующими факторами: величиной коммутируемого тока (выше порога $V_{KЭнас} = f(I_K, V_{KЭ})$); коэффициентом заполнения импульса и температурой кристалла. Динамические потери на транзисторе ($P_{ON/T}$, $P_{OFF/T}$) определяются следующими факторами: величиной коммутируемого тока; величиной удерживаемого напряжения; температурой кристалла и частотой коммутации. Помимо потерь на силовых ключах, следует уделить внимание инверсным диодам, которые, являясь составной частью силового ключа, также изменяют статические и динамические состояния [1]. Это приводит к дополнительным потерям энергии, дополнительному тепловыделению, которое влияет на особенности кристалла транзистора и является составной частью общих потерь мощности. Таким образом, при учете потерь мощности следует учесть, что максимальная температура перехода не должна превышать значение – 150°C (для модульного исполнения) или – 125°C (для дискретного элемента) при всех возможных режимах работы преобразователя электрической энергии. Потери на IGBT и инверсных диодах в общем случае можно описать на примере мостовой схемы силового каскада для полумостовой группы были получены диаграммы токов и напряжений [2]. Для каждой конкретной рабочей точки в установившемся режиме работы силового каскада можно рассчитать потери.

Потери на IGBT [3;4]:

Рассеиваемая мощность при включении

$$P_{ON/T} = f_s \times E_{ON/T} (V, I_{Hмин}, T_{j/T}) \quad (1)$$

Рассеиваемая мощность при выключении

$$P_{OFF/T} = f_s \times E_{OFF/T} (V, I_{Hмакс}, T_{j/T}) \quad (2)$$

Рассеиваемая мощность, выделяемая на канале транзистора

$$P_{FW/T} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} I_K(t) \times V_{KЭ}(t) dt \quad (3)$$

Потери на диодах [5-8]:

Рассеиваемая мощность при выключении

$$P_{OFF/D} = f_s \times E_{OFF/D} (V, I_{Hmax}, T_{j/T}) \quad (4)$$

Рассеиваемая мощность, выделяемая на переходе

$$P_{FW/D} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{IP}(t) \times V_{IP}(t) dt \quad (5)$$

Потери на IGBT при восстановлении гармонических сигналов посредством ШИМ могут быть описаны на примере полумостовой группы трехфазного IGBT модуля для управления трехфазным электродвигателем. Для этого случая достаточно рассмотреть диаграммы токов полумостовой пары, в состав которой входят 2 IGBT и 2 инверсных диода (рис. 1). Отличием этой схемы является то, что ток нагрузки и температура переходов непостоянны в статическом состоянии, и изменяются в зависимости от частоты восстанавливаемого сигнала (50 Гц, 60 Гц, 400 Гц).

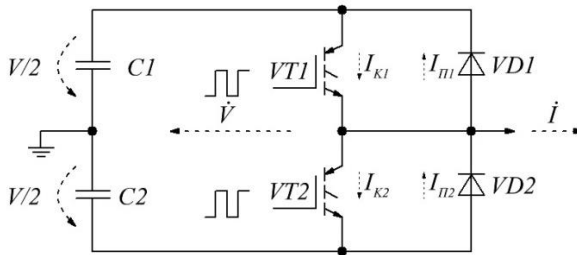


Рисунок 1 - Полумостовая пара трехфазного IGBT модуля

Таким образом, динамические и статические потери на IGBT и диодах являются непостоянными в силу динамического изменения количества энергии, передаваемой от первичного источника к нагрузке за один такт переключения. Потери мощности для силовых ключей с ШИМ регулированием отличается от стандартного метода тем, что коэффициент заполнения импульса при восстановлении гармонического сигнала постоянно изменяется. Для двухтактной схемы среднее за период значение напряжения на нагрузке равно [9]

$$V_L = E(2\gamma - 1), \quad (6)$$

где E – напряжение питания инвертора; γ – коэффициент заполнения импульса.

Для определения формы тока на нагрузке $I_L(\omega t) = I_L(\max) \sin \omega t$ требуется синусоидальное выходное напряжение инвертора [14;15]

$$v_L(\omega t) = V_L(\max) \sin(\omega t + \varphi) = I_L(\max) \times Z_L \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

где $Z_L = \sqrt{R_L^2 + \omega L_L^2}$ – модуль комплексного сопротивления нагрузки обмотки двигателя; $\varphi = \arctg \frac{\omega V_L}{R_L}$ – угол сдвига между током и напряжением нагрузки.

При выполнении условия разницы между частотой ШИМ и частотой восстанавливаемого сигнала можно считать $V_L = v_L(\omega t)$. Тогда коэффициент заполнения импульсов при ШИМ регулировании можно представить в виде [10]

$$\gamma(\omega t) = \frac{1}{2} (1 + m \sin(\omega t + \varphi)) \times \sin \omega t, \quad (8)$$

где $m = \frac{Z_L I_L(\max)}{E}$ – коэффициент модуляции.

Среднюю мощность потерь можно определить, зная концентрации заряженных частиц, а динамические потери на IGBT при помощи уравнения

$$P_{ON} + P_{OFF} = (E_{ON} + E_{OFF}) \times f \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin(\omega t) d(\omega t) = (E_{ON} + E_{OFF}) \times f \frac{1}{\pi}, \quad (9)$$

где E_{ON} – энергия потерь при включении силового ключа и E_{OFF} – энергия потерь при выключении силового ключа в схеме с индуктивной нагрузкой.

Для восстановления гармонического сигнала посредством преобразования на повышенной частоте применяется ШИМ. В настоящее время широкое распространение для систем управления асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами получила серия интегральных схем DSC-контроллеров производства Freescale семейства 56F8xxx. Данная серия контроллеров позволяет программировать пользовательские функции, а система интерфейсов позволяет осуществлять дополнительное управление. Расчеты выполнены для линейного режима, когда частота ШИМ на 2 порядка превышает частоту восстанавливаемого сигнала [11].

При импульсном восстановлении гармонических сигналов вводится коэффициент модуляции m , который будет определять отношение амплитуды основной гармоники восстанавливаемого входного сигнала и

половины амплитуды напряжения питания силового каскада. Этот коэффициент может применяться не только для описания устройств управления электроприводами, но и при амплитудной регулировке мощности. Наиболее адекватным методом анализа потерь на IGBT может быть использована аппроксимация характеристик этих элементов посредством полиномиальных уравнений. Данный метод предполагает определение: зависимостей падения напряжения на IGBT в открытом состоянии от коммутируемого тока и температуры кристалла; зависимостей рассеиваемой энергии при коммутации от тока нагрузки; напряжения линии питания, полиномиальным уравнением $y = f(x) = Ax^2 + Bx + C$. Это уравнение можно решить с достаточным уровнем точности при помощи большинства современных пакетов. На рис.2 показан расчет концентрации электронов и расчет распределения концентрации легирующей примеси в IGBT.

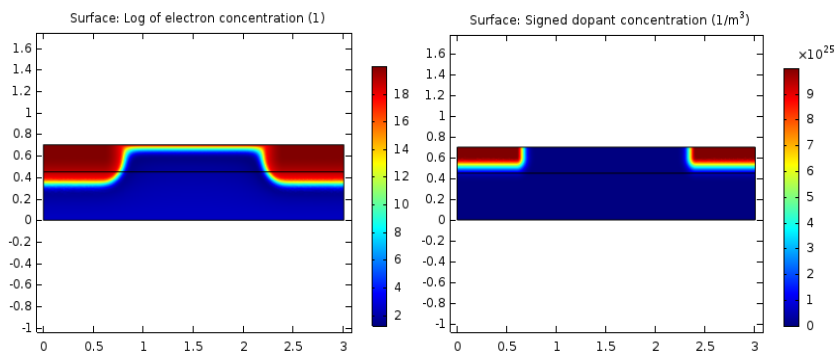


Рисунок 2 - Концентрация электронов и легирующей примеси

Уравнение для динамических потерь IGBT. Зададимся следующими упрощениями:

- Всплески токов на частоте коммутации малы по сравнению с величиной тока за период (достигается при введении в схему дополнительных снабберов);

- Температура кристаллов IGBT и инверсных диодов постоянна);

- Переключение IGBT мало относительно длины импульса.

Уравнение для динамических потерь IGBT получено в результате аппроксимации зависимости потерь от величины коммутируемого тока с учетом температурных коэффициентов и величины напряжения [12]

$$P_{ON+OFF/T} = f \times \left(\frac{A_{ON+OFF/T}}{4} \dot{I}_1^2 + \frac{B_{ON+OFF/T}}{\pi} \dot{I}_1 \right), \quad (10)$$

Результаты расчетов отображены для трехфазного IGBT модуля 600В×16А IRAMX16UP60А серии IMOTION производства International Rectified на рис.3.

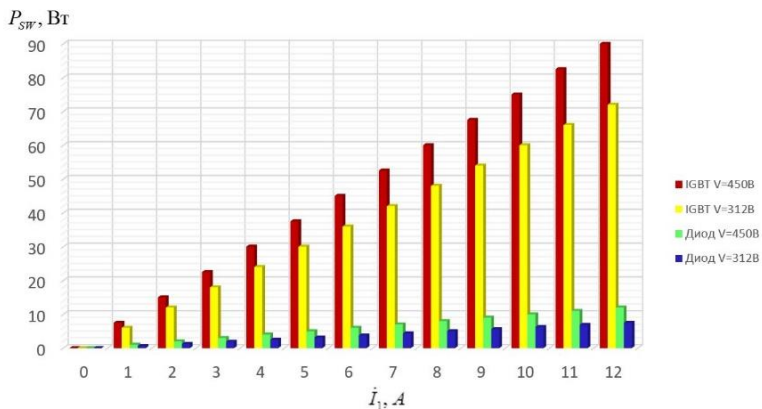


Рисунок 3 - Динамические потери на IGBT и инверсных диодах

Частота коммутации – 12кГц; максимальный коэффициент заполнения импульса – 0,8; температура кристалла – 150°С).

Исследования показали, что применение унифицированных цепей формирования траектории рабочей точки транзистора, позволяют снизить амплитуду токовых всплесков при включении IGBT до нескольких процентов относительно среднего значения коммутируемого тока. Установлена особенность применения снабберов для коммутации больших напряжений – малых токов и для малых напряжений – больших токов. Для данных условий работы снабберы при включении неэффективны за счет дополнительных потерь. Сравнение методик расчета потерь на IGBT и инверсных диодах для конкретного устройства и паспортных данных показали высокую адекватность.

Список литературы:

1. Hierholzer M. Application of High Power IGBT Modules // Nürnberg, Proc. Power Electronics /PCIM, 1996. – P.600-607.

2. Hertrich H. HITFET-A New Generation of Intelligent Low Side Switches // Nürnberg, Proc. Power Electronics /PCIM, 1995. – P.9-15.
3. F. Blaabjerg. Comparison of NPT and PT IGBT-devices for hard switching applications in Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol.2,1994, – P.1174–1181.
4. Gerstenmaier Y.C. Short Circuit Ruggedness, Switching and Stationary Behaviour of New High Voltage IGBT in Measurement and Simulation // EPE, Sevilla, Proc., Vol.1, 1995. – P.583-588.
5. Сидоров И.Н. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники // Справочник. М.: Радио и связь, 1989. – С.384.
6. А. Миронов. Магнитные материалы и магнитопроводы для импульсных источников питания // Радио, №6, 2000. – С.53-54.
7. Githiar A.N. A Comparison of IGBT Models for Use in Circuit Design // PESC, St. Louis, Proc., Vol. 2,1997. – P.1554-1560.
8. IGBT Modules Application note // The 5-th Generation CSTBT IGBT Chip use 12NF/24NF/24A Series / MITSUBISHI ELECTRIC,2007. – 77р.
9. Хансаа А. Гази Алькасра, Чернышов Н.Н., Слипченко Н.И., Писаренко В.М., М. Алкхавалдекс, Умяров К.Т., Башлий С.Ю., Сергеев П.Ю. Расчет потерь в резонансных преобразователях при режимах непрерывных и разрывных токов // Радиотехника /Всеукраинский сборник; №183, ХНУРЭ, 2015. – С.16-20.
10. Чернышов Н.Н., Хансаа А. Гази Алькасра, Писаренко Д.В. Исследование физических процессов в IGBT транзисторах при высокочастотном преобразовании электрической энергии // VIII Міжнародна наукова конференція “Фізичні явища в твердих тілах” / ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2015. – С.160.
11. Чернышов Н.Н., Хансаа А. Гази Алькасра, Слюсаренко А.А. Исследование резонансных инверторов электроэнергии при непрерывных и разрывных токах // Zbior artykulow naukowych / Inzynieria i technologia. Nauka wczoraj, dzis, jutro. Warszawa, 28.02.2016. – С.16-20.
12. Чернышов Н.Н., Гордиенко Ю.Е., Писаренко В.М., Хансаа А. Гази Алькасра, Умяров К.Т. Математический анализ динамических потерь на IGBT транзисторах и методов их снижения // Радиотехника / Всеукраинский сборник; №180, ХНУРЭ, 2015. – С.72-75.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА IGBT ТРАНЗИСТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Чернышов Н.Н., канд. техн. наук, доцент,
Салманов В.П., студент,
Рыжкин П.П., студент,
Лысенко А.С., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им В.Г. Шухова*

Аннотация. На основании условий работы IGBT рассмотрены процессы восстановления гармонических сигналов с использованием широтно-импульсной модуляции, проанализирована зависимость рассеиваемой мощности на IGBT и диоде в зависимости от длительности энергообмена через инверсные диоды, а также рассчитаны статические и динамические потери на IGBT и инверсных диодах.

Ключевые слова: инверсные диоды, потери мощности на IGBT, ШИМ регулирование, восстановление гармонического сигнала, полумостовая пара, рассеиваемая мощность на IGBT, статические потери, динамические потери.

Потери на IGBT при восстановлении гармонических сигналов посредством ШИМ могут быть описаны на примере полумостовой группы трехфазного IGBT модуля для управления трехфазным электродвигателем. Как и для схемы полного моста, достаточно рассмотреть диаграммы токов полумостовой пары, в состав которой входят 2 IGBT и 2 инверсных диода (рис. 1). Отличием этой схемы является то, что ток нагрузки и температура переходов непостоянны в статическом состоянии, и изменяются в зависимости от частоты восстанавливаемого сигнала (50 Гц, 60 Гц, 400 Гц и т.п.). Таким образом, динамические и статические потери на IGBT и диодах являются непостоянными в силу динамического изменения дозы энергии, передаваемой от первичного источника к нагрузке за один такт переключения.

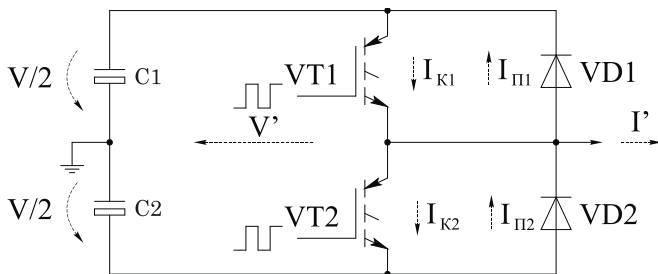


Рисунок 1 - Полумостовая пара трехфазного IGBT модуля с инверсными диодами

Потери мощности для силовых ключей с ШИМ регулированием отличается от стандартного метода тем, что коэффициент заполнения импульса при восстановлении гармонического сигнала постоянно изменяется. Для двухтактной схемы среднее за период значение напряжения на нагрузке равно

$$V_L = E(2\gamma - 1), \quad (1)$$

где E – напряжение питания инвертора; γ – коэффициент заполнения импульса.

Для формирования формы тока на нагрузке $I_L(\omega t) = I_L(\max) \sin \omega t$ требуется синусоидальное выходное напряжение инвертора:

$$V_L(\omega t) = V_L(\max) \sin(\omega t + \varphi) = I_L(\max) \cdot Z_L \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где $Z_L = \sqrt{R_L + \omega L_L}$ – модуль комплексного сопротивления нагрузки обмотки двигателя; $\varphi = \arctg \frac{\omega V_L}{R_L}$ – угол сдвига между током и напряжением нагрузки.

При выполнении условия разницы между частотой ШИМ и частотой восстанавливаемого сигнала можно считать $V_L = v_L(\omega t)$. Тогда коэффициент заполнения импульсов при ШИМ регулировании можно представить в виде

$$\gamma(\omega t) = \frac{1}{2}(1 + m \sin(\omega t + \varphi)) \cdot \sin \omega t, \quad (3)$$

где $m = \frac{Z_L I_L(\max)}{E}$ – коэффициент модуляции.

Среднюю мощность потерь можно рассчитать по следующей методике:

Динамические потери на транзисторах

$$P_{ON} + P_{OFF} = (E_{ON} + E_{OFF}) \cdot f \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin(\omega t) d(\omega t) = (E_{ON} + E_{OFF}) \cdot f \frac{1}{\pi}, \quad (4)$$

где E_{ON} – энергия потерь при включении силового ключа в схеме с индуктивной нагрузкой для заданного напряжения питания и амплитуды выходного тока; E_{OFF} – энергия потерь при выключении силового ключа в схеме с индуктивной нагрузкой для заданного напряжения питания и амплитуды выходного тока.

Статические потери на транзисторах

$$P_{COND} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_L(\omega t) \cdot V_{CE(ON)} \gamma(\omega t) d(\omega t) = I_L(\max) V_{CE(ON)} \left(\frac{1}{4} + \frac{m}{3\pi} \cos \varphi \right) \quad (5)$$

Динамические потери на инверсных диодах

$$P_{\pi} = \frac{E}{2} \frac{Q_{\pi}}{2} f = \frac{1}{4} I_{\pi} E t_{\pi} f, \quad (6)$$

где I_{π} – ток утечки диода; t_{π} – время обратного восстановления диода.

Статические потери на диодах

$$P_{DCOND} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_L(\omega t) \cdot V_{DF} (1 - \gamma(\omega t)) d(\omega t) = I_L(\max) V_{DF} \left(\frac{1}{4} - \frac{m}{3\pi} \cos \varphi \right) \quad (7)$$

В общем случае для восстановления гармонического сигнала посредством преобразования на повышенной частоте применяется ШИМ, при которой осуществляется компарация мгновенного значения гармонического сигнала и последовательности пилообразных импульсов. Следует отметить, что в настоящее время широкое распространение для систем управления асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами получила серия интегральных схем DSC-контроллеров производства Freescale семейства 56F8xxx. Данная серия контроллеров позволяет (помимо существующих функций) программировать пользовательские функции, а система интерфейсов позволяет осуществлять дополнительное управление с применением сторонних микроконтроллеров и микропроцессоров. Это дает возможность расширить номенклатуру средств работы данного семейства DSC-контроллеров, расширить диапазон мощностей управляемых приводов сотен кВт, осуществлять дополнительные сервисные и защитные функции, применять нечеткую логику при работе электродвигателя в многопараметрической системе. Расчеты в

данном разделе приведены для линейного режима, когда частота ШИМ на 2 порядка превышает частоту восстанавливаемого сигнала [1]. При импульсном восстановлении гармонических сигналов введем коэффициент модуляции m , который будет определять отношение амплитуды основной гармоники восстанавливаемого входного сигнала и половины амплитуды напряжения питания силового каскада. Формы токов и напряжений на IGBT и диодах (рис. 2), сдвинутые относительно друг друга по времени, являются идентичными в области знакопеременных полувольт сигнала по причине симметрии выходного каскада и того, что восстанавливаемый сигнал – гармонический. Следовательно, описание форм токов и потерь достаточно выполнить для одного полупериода.

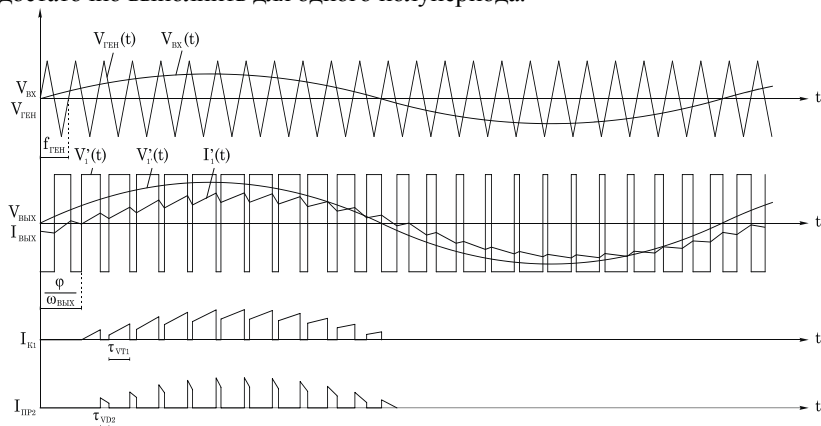


Рисунок 2 - Диаграммы входных и выходных напряжений и токов на элементах полумостовой пары при восстановлении синусоидального сигнала

Наиболее адекватным методом анализа потерь на IGBT транзисторах и инверсных диодах может быть использована аппроксимация характеристик этих элементов посредством полиномиальных уравнений. Данный метод предполагает определение: зависимостей падения напряжения на транзисторах и диодах в открытом состоянии от коммутируемого тока и температуры кристалла; зависимостей рассеиваемой энергии при коммутации от тока нагрузки; напряжения линии питания и температуры кристалла, полиномиальным уравнением $y = f(x) = Ax^2 + Bx + C$. Это уравнение можно решить с

достаточным уровнем точности при помощи большинства современных пакетов для математического моделирования методом подгонки кривых. Коэффициенты А, В, С являются обобщающими для искомых параметров. Параметры IGBT и инверсных диодов могут быть взяты в документации на эти элементы, либо определены экспериментально [2].

Зададимся следующими упрощениями:

- всплески токов на частоте коммутации малы по сравнению с величиной тока за период (достигается при введении в схему дополнительных снабберов);

- температура кристаллов транзисторов и инверсных диодов постоянна (допускается, если частота восстанавливаемого сигнала постоянна);

- собственная задержка переключения IGBT и диодов пренебрежительно мала по сравнению с длительностью импульса;

- модуляция линейна.

Используя аппроксимацию выходной характеристики IGBT и ВАХ диода в первом квадранте в соответствии с уравнением $y = Bx + C$. Учитывая температурные коэффициенты падения напряжения, могут быть получены следующие уравнения для статических потерь:

для IGBT

$$P_{\text{ПР/Т}} = \left(\frac{1}{2} - \frac{\tau_{\text{ДТ}}}{T} \right) \left(\frac{B_{\text{ПР/Т}}}{4} \cdot I_1^2 + \frac{C_{\text{ПР/Т}}}{\pi} \cdot I_1' \right) + m \cdot \cos \varphi \cdot \left(\frac{B_{\text{ПР/Т}}}{3\pi} \cdot I_1^2 + \frac{C_{\text{ПР/Т}}}{8} \cdot I_1' \right) \quad (8)$$

для инверсных диодов

$$P_{\text{ПР/Д}} = \left(\frac{1}{2} + \frac{\tau_{\text{ДТ}}}{T} \right) \left(\frac{B_{\text{ПР/Д}}}{4} \cdot I_1^2 + \frac{C_{\text{ПР/Д}}}{\pi} \cdot I_1' \right) - m \cdot \cos \varphi \cdot \left(\frac{B_{\text{ПР/Д}}}{3\pi} \cdot I_1^2 + \frac{C_{\text{ПР/Д}}}{8} \cdot I_1' \right), \quad (9)$$

где $\tau_{\text{ДТ}}$ – время, в течение которого происходит энергообмен через инверсные диоды.

На рис. 3 приведена зависимость отношения общей выделяемой мощности без инверсных диодов к общей выделяемой мощности при условии наличия инверсных диодов в зависимости от длительности энергообмена с ними. Уравнения для динамических потерь получены в результате аппроксимации зависимости потерь от величины коммутируемого с учетом температурных коэффициентов и величины напряжения питания в соответствии с $y = Ax^2 + Bx$:

для IGBT

$$P_{\text{ON+OFF/Т}} = f \cdot I_1' \cdot \left(\frac{A_{\text{ON+OFF/Т}}}{4} \cdot I_1^2 + \frac{B_{\text{ON+OFF/Т}}}{\pi} \right) \quad (10)$$

для инверсных диодов

$$P_{\text{OFF/D}} = f \cdot I_1' \cdot \left(\frac{A_{\text{OFF/D}}}{4} \cdot I_1' + \frac{B_{\text{OFF/D}}}{\pi} \right) \quad (11)$$

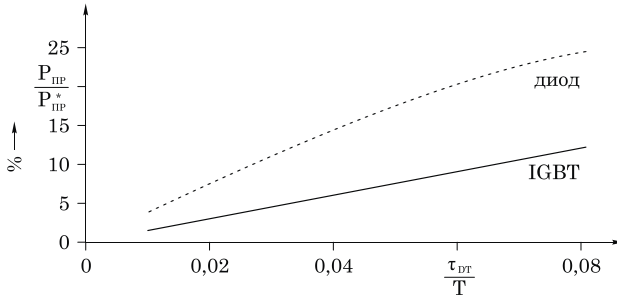


Рисунок 3 - Зависимость рассеиваемой мощности на IGBT и диоде от длительности времени энергообмена

Результаты расчетов отображены на рис. 4 и рис. 5 для трехфазного IGBT модуля 600В×16А IRAMX16UP60А серии IMOTION производства International Rectifie (частота коммутации – 12кГц; максимальный коэффициент заполнения импульса – 0,8; температура кристалла – 150°С) [2-5].

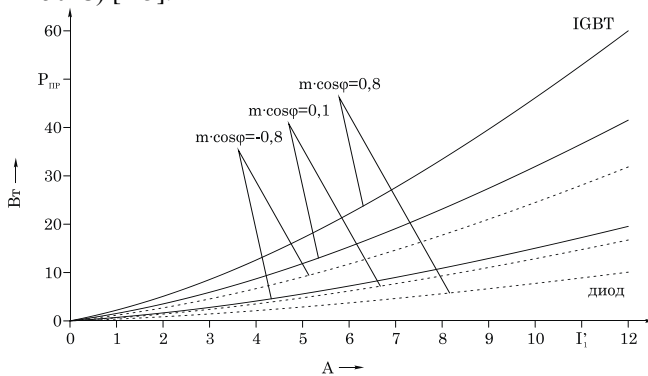


Рисунок 4 - Статические потери на IGBT и инверсных диодах для различных значений коэффициента модуляции

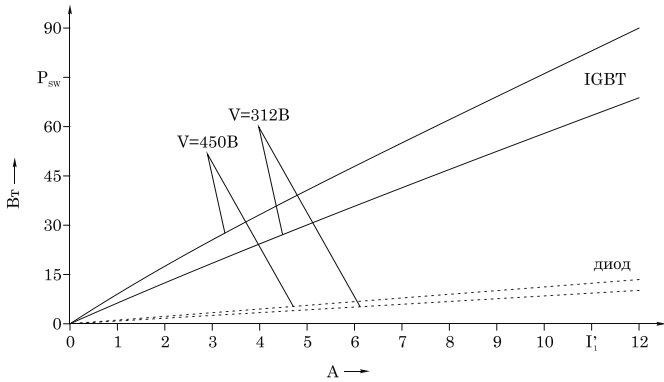


Рисунок 5 - Динамические потери на IGBT и инверсных диодах для различных значений напряжения питания силового каскада

Сравнение полученных теоретически данных с приведенными данными показаны на рис. 6. на основании документации силового модуля.

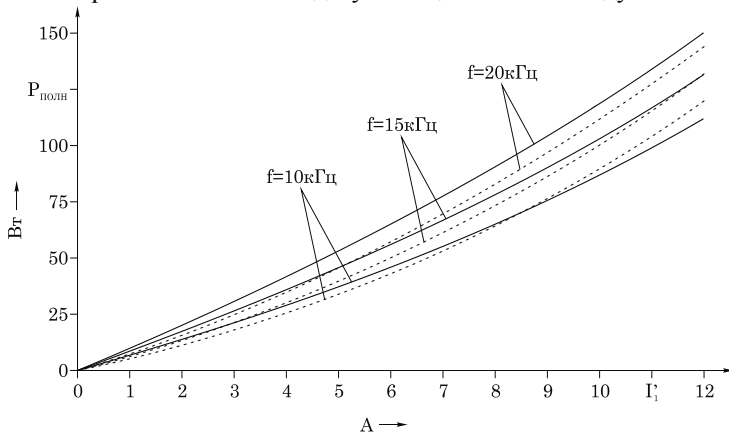


Рисунок 6 - Расчет потерь и заявленные разработчиком потери на силовом модуле IRAMX16UP60A для различных частот

Практическое значение статьи заключается в исследовании гармонических сигналов с использованием широтно-импульсной модуляции в IGBT. В статье проанализирована зависимость рассеиваемой мощности на IGBT и диоде в зависимости от длительности

энергообмена через инверсные диоды, а также рассчитаны статические и динамические потери на IGBT и инверсных диодах. Результаты исследований данной методики расчета потерь на IGBT и инверсных диодах показали высокую адекватность.

Список литературы:

1. Чернышов Н.Н., Писаренко В.М., Умяров К.Т., Хансаа А. Гази Алькаса. Исследование динамических потерь на IGBT транзисторах при работе силовых каскадов на индукционную нагрузку // Applied radio electronics; v.13, №4 / Academy of sciences of applied radio electronics, 2014. – С.440-443.
2. Чернышов Н.Н., Писаренко В.М., Умяров К.Т., Хансаа А. Гази Алькаса, Шматько А.В., Коник А.Ю. Расчет динамических характеристик и процессов восстановления гармонических сигналов IGBT транзисторов // Радиотехника / Всеукраинский сборник; №179, ХНУРЭ, 2014. – С.76-83.
3. Khansaa A. Ghazi, Chernyshov N.N., Pisarenko V.M., Umyarov K.T. Studying physical processes in crystals without inversion centre // Radioelectronics & informatics; №3, KhNURE, 2014. – P.11-14.
4. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. - М.: Техносфера, 2006. – 632с.
5. Hierholzer M. Application of High Power IGBT Modules. PCIM 1996, Nürnberg, Proc. Power Electronics. – P.600-607.

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

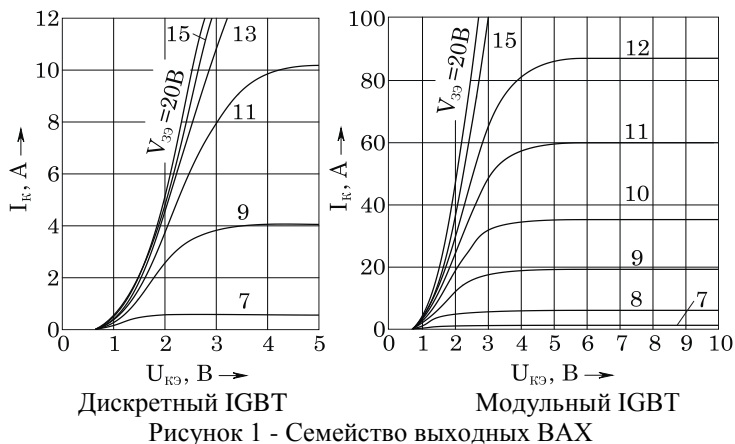
Чернышов Н.Н., канд. техн. наук, доцент,
Куюмчиев М.С., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им В.Г. Шухова*

Аннотация. Рассмотрены выходные статические ВАХ биполярных транзисторов с изолированным затвором. Рассмотрены процессы переключения IGBT, т.е. их динамические характеристики, представлены осциллограммы данных процессов.

Ключевые слова: IGBT, MOSFET, МДП (металл-диэлектрик-полупроводниковый полевой транзистор), ток отсечки, прямое включение, рабочая точка, канал, сопротивление канала, прямое и обратное напряжение, область безопасной работы.

Режим работы схемы определяет диапазон изменений амплитуды удерживаемых напряжений и коммутируемых токов, соответственно, в закрытом и открытом состояниях. Таким образом, наибольшее внимание уделяется зависимости параметров конкретного прибора от воздействия выходных токов и напряжений. Для самого ключевого прибора связь выходного тока и напряжения задается выходной характеристикой. Это одна из самых главных характеристик, определяющих максимально возможный ток, который протекает через транзистор, при определенном входном напряжении для заданного входного воздействия. По аналогии с MOSFET, ток отсечки коллектор-эмиттер I_{CES} между коллектором и эмиттером очень мал, если напряжение коллектор-эмиттер V_{CE} положительное и напряжение затвор-эмиттер V_{GE} ниже порогового напряжения $V_{GE(th)}$. С ростом V_{CE} значение I_{CES} также увеличивается. При превышении определенного максимального напряжения коллектор-эмиттер V_{CES} , происходит лавинный пробой перехода p^+ область / n^- дрейфовая зона / n^+ эпитаксиальный слой (напряжение пробоя $V_{(BR)CES}$). Выходные ВАХ IGBT приведены на рис. 1. Данные ВАХ являются статическими, то есть для ключевого режима работы состояние транзистора по выходу определяется перемещением его рабочей точки вдоль линии нагрузки [1].



Остаточное напряжение на IGBT транзисторе складывается из двух составляющих: прямого напряжения эмиттерного перехода р-п-р структуры (влияние диодной составляющей) и падения напряжения на открытом канале транзистора (влияние составляющей на управляющей MOSFET – структуре)

$$V_{CES} = V_{p-n} R_{CE(on)} I_C, \quad (1)$$

где V_{p-n} – диодная составляющая остаточного напряжения; $R_{CE(on)}$ – сопротивление открытого канала; I_C – ток коллектора.

Сопротивление открытого канала транзистора представляет собой промодулированную неосновными носителями область канала проводимости и имеет величину много меньшую, чем аналогичный параметр у транзисторов MOSFET. Степень модуляции канала зависит от управляющего напряжения, которое определяет величину насыщения.

Для IGBT можно (хотя и условно) определить сопротивление открытого канала, по сравнению с сопротивлением МДП структуры [2]

$$R_{CE(on)} = \frac{R_{DS(on)}}{h_{FE}}, \quad (2)$$

где h_{FE} – коэффициент усиления по току р-п-р структурой IGBT.

Физически $V_{(BR)CES}$ приблизительно соответствует обратному напряжению коллектор-эмиттер V_{CER} биполярного р-п-р транзистора в структуре IGBT. Усиленный ток, вызванный лавинным пробоем, может привести к выходу из строя IGBT, со скоростью включения

биполярного транзистора. Однако, база и эмиттер практически закорочены металлизацией эмиттера и разделены только боковым сопротивлением p^+ области. При некоторых структурных улучшениях биполярных транзисторов с изолированным затвором, ток лавинного пробоя в ячейке удерживается на минимальном уровне, что приводит к высокой стабильности при прямом напряжении в выключенном состоянии.

В прямом запираемом включении обратный ток $I_{СИ.НАС}$ (I_{DSS}) или $I_{КЭ.НАС}$ (I_{CES}) увеличивается незначительно по мере увеличения обратного напряжения. Лавинный пробой возникает при превышении максимального длительного обратного напряжения $V_{СИ.НАС}$ (V_{DSS}) или $V_{КЭ.НАС}$ (V_{CES}). Различные конструкции современных MOSFET создают “лавинную стабильность”, когда для каждого кристалла допустима индивидуальная лавинная энергия E_A . Однако у мощных модулей некоторые кристаллы MOSFET при отличающемся запирающем напряжении часто соединяются параллельно [3].

Процессы переключения IGBT во многом похожи на процессы переключения MOSFET. Этап включения состоит из стадии задержки $t_{D(on)}$ и нарастания тока коллектора. Временные параметры определяются следующими равенствами

$$t_{D(on)} = R_{IN} C_{IN} \ln \frac{E_{IN}^+ + E_{IN}^-}{E_{IN}^+ - E_0}; \quad (3)$$

$$t_r \approx R_{IN} C_{GC} \ln \frac{E}{E_{IN}^+ - V_{TH}}, \quad (4)$$

$$t_s \approx 3R_{IN} C_{IN}. \quad (5)$$

При переключении входного сигнала до отрицательного значения E_{IN} начинается процесс выключения, первый этап которого представляет собой некоторую задержку включения $t_{D(off)}$, которая описывается уравнениями (3-5). Затем наступает стадия спада коллекторного тока, которая условно разделяется на две фазы: инжекционную и рекомбинационную. Инжекционная фаза характеризуется относительно высокой скоростью изменения тока

$$\frac{di_C}{dt} \approx - \frac{V_{TH} + E_{IN}^-}{R_L R_{IN} C_{GC}}. \quad (6)$$

На этапе спада тока входное напряжение уменьшается и при значении

$$V_{GC} \approx V_0 + \frac{I_0}{S}, \quad (7)$$

где I_0 – начальная амплитуда остаточного тока.

Инжекционная фаза переходит в рекомбинационную, а скорость спада

$$i_C(t) \approx kQe^{-\frac{t}{\tau}}; kQ = I_0, \quad (8)$$

где Q – накопленный заряд неосновных носителей; τ – время жизни неосновных носителей; k – коэффициент пропорциональности.

Осциллограммы процессов переключения приведены на рис. 2. Напряжения пробоя MOSFET и IGBT транзисторов увеличиваются с ростом температуры. Если силовые модули используются при очень низких окружающих температурах, то необходимо учесть, что значения $V_{СИ.НАС}$ (V_{DSS}) или $V_{КЭ.НАС}$ (V_{CES}), приведенные в документации, соответствуют окружающей температуре – 25°C.

В прямом включении MOSFET и IGBT имеют различные характеристики. MOSFET ведет себя подобно обычному активному сопротивлению, то есть напряжение сток-исток будет прямо пропорционально току стока (I_C). Коэффициент пропорциональности равен сопротивлению канала сток-исток в открытом состоянии $R_{СИ(ВКЛ)}$ ($R_{DS(ON)}$), которое определяет потери проводимости $P_{ПОТ}$ (P_{COND}) в полном проводящем состоянии (мощность потерь $P_{ПОТ} = I_{C2} \cdot R_{СИ(ВКЛ)}$). $R_{СИ(ВКЛ)}$ увеличивается с ростом температуры перехода $T_{ПЕР}$ (T_J) в соответствии со следующим выражением [4]

$$\frac{R_{СИ(ВКЛ)}(T_{ПЕР})}{R_{СИ(ВКЛ)}(25^\circ\text{C})} = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)^{T_{ПЕР}-25^\circ\text{C}}, \quad (9)$$

где $\alpha = 0,6 \dots 0,9$.

Для температуры $T_{ПЕР} = 125^\circ\text{C}$ значение сопротивления приблизительно удваивается относительно значения $R_{СИ(ВКЛ)}$ ($R_{DS(ON)}$), приведенного в документации для температуры – 25°C. Характеристика IGBT в прямом включении и состоянии насыщения может быть представлена в виде линейной замещающей характеристики, аналогичной диодам [5]

$$V_{КЭ.НАС} = V_{КЭ}(T_0) + r_{КЭ}I_K. \quad (10)$$

Температурный коэффициент $V_{КЭ}(T_0)$ и $r_{КЭ}$ для кристаллов IGBT – положительный. Это означает, что $V_{КЭ.НАС}$ нарастает одновременно с ростом температуры. Данная особенность делает возможным параллельное соединение, которое используется в силовых модулях.

Для большинства серий IGBT модулей напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения $V_{КЭ.НАС}$ (V_{CESAT}) и прямое падение напряжение на диоде $V_{пр}$ (V_F) приводятся в документации на уровне кристалла. Данные значения могут использоваться для определения соотношения потерь мощности IGBT и диодов. При тяжелой

коммутации индуктивных нагрузок транзисторы должны работать при прямоугольной рабочей кривой, которая показывает зависимость между рабочим напряжением и током нагрузки [5].

Область безопасной работы (ОБР) определяет границы интервала надежной работы транзистора в пределах заданных условий перегрузки. Используется несколько видов диаграмм ОБР:

- ОБР для одноимпульсного режима работы с указанием параметров (t_p – длительность импульса; $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $T_J \leq T_{JMAX}$) и периодическим включением [6];

- ОБР с обратным смещением для периодических выключений с $T_J \leq T_{JMAX}$ и заданном $V_{3Э}$ (V_{GE}) [7];

- ОБР с использованием неперiodического выключения тока короткого замыкания при $T_J \leq T_{JMAX}$ и заданной длительности тока короткого замыкания [8];

- ОБР с использованием индуктивности схемы и напряжения затвор-эмиттер (число коротких замыканий ограничено с интервалами между замыканиями не менее 1 сек).

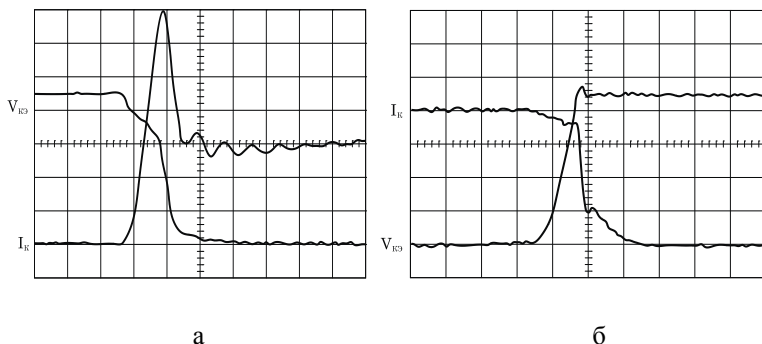


Рисунок 2 - Осциллограммы процессов переключения IGBT (а – процесс включения; б – процесс выключения (100 В/дел; 5 А/дел))

Для IGBT и номинальным напряжением в диапазоне 600-1200 В. Для полного включения падение напряжения находится в диапазоне 1,5-3,5 В. Это значительно меньше, чем характерное падение напряжения на силовых MOSFET в проводящем состоянии с такими же номинальными напряжениями. С другой стороны, IGBT 200 В и меньше имеют более низкое значение напряжения во включенном состоянии. По быстродействию IGBT уступают MOSFET. Типичные

значения времени распределения накопленного заряда и спада тока при выключении IGBT находятся в диапазонах 0,2-0,4 и 0,2-1,5 мкс, соответственно. Область безопасной работы IGBT позволяет успешно обеспечить его надежную работу без применения дополнительных цепей формирования траектории переключения при частотах от 10 до 20 кГц для модулей с номинальными токами в несколько сотен ампер. Такими качествами не обладают биполярные транзисторы, соединенные по схеме Дарлингтона. Полевые транзисторы заменили биполярные транзисторы в ключевых источниках питания с напряжением до 500 В, а дискретные IGBT заменили источники питания с напряжением до 3500 В. В последних разработках силовых модулей применены кристаллы IGBT транзисторов, выполненные по планарной технологии SPT, или кристаллы MOSFET и IGBT транзисторов с пазовой структурой затвора. Более подробная информация по специфическим особенностям компонентов можно найти в соответствующей документации или руководстве по применению “IGBT and MOSFET Power Modules Application Manual” [9].

Вследствие своей структуры MOSFET транзисторы проводят электрический ток в обратном направлении. Но данные “инверсные” диоды обладают плохими динамическими характеристиками, что ограничивает возможность применения MOSFET транзисторов в мостовых схемах, особенно при наличии высоких напряжений. IGBT элемент, не проводит электрический ток в обратном направлении. Поскольку обратное напряжение мало и обычно не требуется в стандартных схемах, то в состав модулей вводятся неуправляемые диоды, включенные антипараллельно IGBT.

Список литературы:

1. Чернышов Н.Н., Хансаа А. Гази Алькаса, Слюсаренко А.А. Исследование резонансных инверторов электроэнергии при непрерывных и разрывных токах // Сборник научных статей / Техника и технология. Наука вчера, сегодня, завтра; Варшава, 28.02.2016. – С.16-20.
2. Хансаа А. Гази Алькаса, Чернышов Н.Н., Слипченко Н.И., Писаренко В.М., М. Алкхавалдекс, Умяров К.Т., Башлий С.Ю., Сергеев П.Ю. Расчет потерь в резонансных преобразователях при режимах непрерывных и разрывных токов // Радиотехника / Всеукраинский сборник; №183, ХНУРЭ, 2015. – С.16-20.
3. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. - М.: Техносфера, 2006. – 632с.

4. Hierholzer M. Application of High Power IGBT Modules. PCIM 1996, Nürnberg, Proc. Power Electronics. – P.600-607.
5. Constapel R., Korec J., Baliga B.J. Trench-IGBTs with Integrated Diverter Structures // ISPSD 1995, Yokohama, Proc. – P.201-206.
6. Jonathan Dodge, John Hess // IGBT Tutorial. Advanced power technology. 2001. – P.15.
7. Резников А., Воронин П., Щепкин Н. Гибридный IGBT – статические и динамические характеристики // Силовая электроника. №3. 2006. – С.28-30.
8. Practical Considerations In High Performance MOSFET, IGBT and MCT gate drive circuits // Application Note / Texas Instruments. 1999. – P.16.
9. Githiar, A.N. A Comparison of IGBT Models for Use in Circuit Design // PESC 1997, St. Louis, Proc., Vol. II. – P.1554-1560.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ROS, GAZEBO

Юдин Д.А., канд. тех. наук, доцент,
Вашенко Р.А., канд. тех. наук, ст. преподаватель,
Черняев М.Ю.

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос осуществления имитационного моделирования объектов робототехники. Проводится сравнительный анализ существующих программных решений. Описывается процесс компьютерной симуляции полета беспилотного летательного аппарата с помощью программного комплекса Robotic Operation System и среды моделирования Gazebo. Приводятся результаты исследования.

Ключевые слова: имитационная модель, беспилотный летательный аппарат, ROS, Gazebo.

Будущее развития робототехники, в том числе беспилотных летательных аппаратов - это качественное моделирование [1], которое позволяет быстрее разрабатывать и повышать производительность за счет сокращения процесса проб и ошибок при постоянном тестировании на физических машинах.

Но поскольку моделирование беспилотного летательного аппарата распространяется на моделирование всей роботизированной системы, включая роение, поиск путей, экологическую осведомленность, автономное картографирование и навигацию без GPS, необходимы как можно более мощные инструменты.

В ходе исследований было проанализировано три основных программных комплекса [2-4] для решения поставленной задачи. Стоит отметить, что приведены лишь некоторые системы, характерные для своего класса, интересные с точки зрения критериев, определенных спецификой задачи. Основные характеристики рассмотренных систем отображены в таблице 1.

В результате оценки и сравнения выбрана связка ROS и Gazebo. Для симуляции поведения группы роботов была использована модель робота в ROS: квадрокоптер Hector Quadrotor [5]. Достоинством данной модели является её широкая популярность в исследовательских работах,

наличие различных плагинов взаимодействия в симуляторе Gazebo и в робототехнической операционной системе ROS.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика рассмотренных систем

Название	MSRS	ROS + Gazebo	Webots
Параметры			
Гибкость физических настроек	Низкая	Высокая	Высокая
Возможность проектирования произвольных роботов	Да	Да	Да
Удобство импортирования моделей из средств твердотельного моделирования	Низкое	Низкое	Низкое
Открытый исходный код	Нет	Да	Нет
Наличие визуального языка программирования	Да	Нет	Нет
Возможность загрузки управляющей программы в реального робота	Нет	Да	Нет

Модель квадрокоптера Hector Quadrotor, поддерживаемая ROS и доступная в библиотеке моделей Gazebo, может включать в себя лазерный дальномер, камеру и другие датчики. Прототипом такого квадросторного БПЛА являются квадрокоптеры, зачастую собираемые вручную из небольших, легких элементов конструкции и электромеханических компонентов с низким энергопотреблением, как, например, квадрокоптер, показанный на рис.1,а. Модель из Gazebo для квадрокоптера Hector Quadrotor представлена на рис.1,б.



Рисунок 1 - Четырехроторный БПЛА: фото (а) и модель из Gazebo (б)

Для управления моделью квадрокоптера использовался плагин `geometry_msgs` [6]. Модель принимает сообщения `geometry_msgs / Twist` по теме `cmd_vel`, как и многие другие роботы в ROS. Структура входных данных имеет следующий вид:

'[3.0, 0.0, 0.0]' '[0.0, 0.0, 2]' – сообщение `geometry_msgs/Twist`, имеющее два вектора: `linear` и `angular`, каждый из которых состоит из трех числовых элементов с плавающей точкой. '[3.0, 0.0, 0.0]' становится линейным значением с $x=3$, $y=0$, $z=0$ и '[0.0, 0.0, 2]' является угловым значением с $x=0$, $y=0$, $z=2$. Эти аргументы имеют YAML – синтаксис. Опубликовать сообщение в тему можно вручную:

```
rostopic pub -1 /cmd_vel geometry_msgs/Twist -- '[0.0, 0.0, 0.0, 0.3]' '[0.0, 0.0, 0.0]'
```

На основе передачи команд плагину, была написана управляющая программа на языке Python, позволяющая осуществлять управление посредством нажатия клавиш. Скрипт запускается как узел ROS:

```
$ roscore
$ roslaunch teleop_twist_keyboard teleop_twist_keyboard.py
```

В процессе работы данного скрипта на тему `/cmd_vel` узел `teleop_twist_keyboard` публикует сообщения каждый раз, когда была нажата клавиша на клавиатуре.

Для представления вычислительного графа ROS в графическом виде, представляется инструмент `rqt_graph` [7]. Схема вычислительного графа показывает все активные узлы и темы, которые их связывают.

```
$ roslaunch rqt_graph rqt_graph
```

Видно, что узел `teleop_twist_keyboard` публикует сообщения в тему `/cmd_vel`, а узел `rostopic` подписывается на эту тему (рис.2).

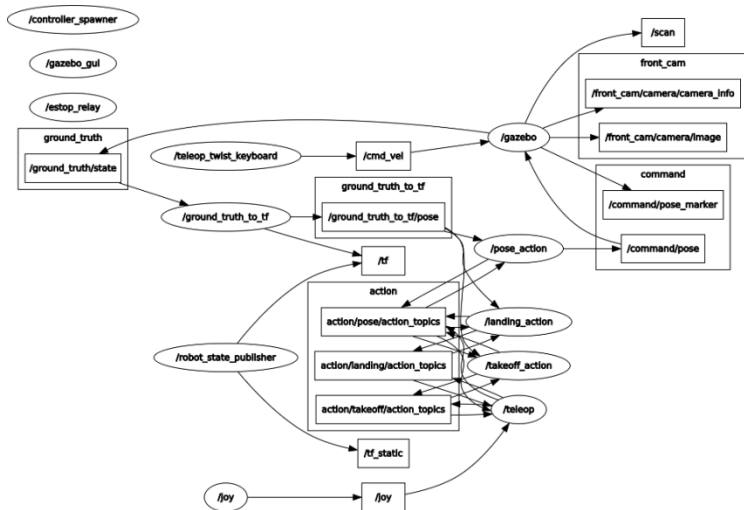


Рисунок 2 - Вычислительный граф ROS для системы управления дроном

Для автоматического управления моделью квадрокоптера написан скрипт, использующий тот же принцип публикации сообщений в тему /cmd_vel через узел teleop_twist_keyboard. Это позволяет создавать заранее заготовленную последовательность команд управления и осуществлять автономный полёт. Команды хранятся в файле .csv, который читает скрипт.

На рис.3 показана симуляция дрона, летящего по заданному алгоритму отклонений (рис.3).

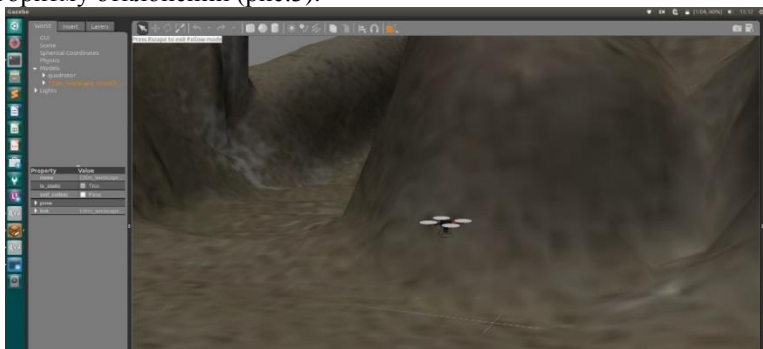


Рисунок 3 - Снимок экрана с запущенной симуляцией полета

В результате проведенных исследований была получена адекватная модель беспилотного летательного аппарата, позволяющая отлаживать алгоритмы управления и удовлетворяющая основным показателям качества:

- надежность (модель способно поддерживать работоспособное состояние в заданных условиях);
- функциональность (способность подучать необходимый результат при моделировании);
- эффективность (способность обеспечивать работоспособность по отношению к выделяемым для этого ресурсам);
- сопровождаемость (минимизация усилий при внесении изменений для устранения ошибок и модификации);

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6

Список литературы:

1. Бондаревский, А.С. Имитационное моделирование: определение, применимость и техническая реализация / А.С. Бондаревский А.В. Лебедев // Фундаментальные Исследования. 2011. № 12-3
2. Использование симуляторов в робототехнике [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://m.habr.com/company/robotgeeks/blog/2589/> (Дата обращения: 18.12.2018)
3. Гай В. Microsoft Robotics Developer Studio. Программирование алгоритмов управления роботами. -М.: ЭКОМ Паблишерз. 2012. - 184 с.:
4. Gazebo [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://gazebosim.org/> (Дата обращения: 20.12.2018)
5. Hector_quadrotor [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: http://wiki.ros.org/hector_quadrotor (Дата обращения: 15.11.2018)
6. ROS Documentation (geometry_msgs) [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: http://wiki.ros.org/geometry_msgs (Дата обращения: 16.12.2018)
7. ROS Documentation (rqt_graph) [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: http://wiki.ros.org/rqt_graph (Дата обращения: 16.12.2018)
8. ROS на практике [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://robotosha.ru/robotics/ros-practice.html> (Дата обращения: 15.11.2018)
9. Компьютерное моделирование устройств робототехники [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://knowledge.allbest.ru/programming/3c0b65635b3ad78b5d43b89521306d26_0.html (Дата обращения: 15.12.2018)