САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР

по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова

23 сентября 2021

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А. А. Вавилова

23 сентября 2021

Санкт-Петербург
2021

УДК 681.5(08)

Библиографическое описание

Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. Ежегод. журн. / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Электрон. журн. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. 95 с. – Режим доступа к журн.: – https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik_2021.pdf – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7629-2898-4

ISBN 978-5-7629-2898-4

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Мобильный робот с избыточным управлением
Абрамов П.В. 5
Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро
Андреев А.В. 8
Генерация иерархических моделей регулярных микроэлектронных объектов
Андреев Л.Е., Зибарев К.М., Милакин А.Д., Миронов С.Э. 12
Системно-аналитические исследования городской электросети на основе современных информационных технологий
Арамян А.С., Антропова В.В. 15
Анализ фреймворков для нейронных сетей
Бовшик П.П. 19
Система управления рулевым приводом мобильного робота
Богданова С.М. 22
Исследование модели многосвязного упругого объекта методами бифуркационного анализа
Болотин Н.В. 26
Система управления приводом на основе бесколлекторного электродвигателя постоянного тока
Бондарчук А.П. 30
Система автоматической синхронизации синхронных генераторов с применением микроконтроллерной системы управления
Гринишена С.А., Ким А.А., Михайлов Д.П. 34
Повышение эффективности технического обеспечения угледобывающего предприятия с использованием метода экспертного оценивания (на примере Шахтопроходческого управления «Восточное»)
Игнатенко А.А. 37
Контроль и диагностика в производстве керамической плитки
Кадим Мохаммед Худаир 41
Адаптивное управление насосной системой нефтяных скважин
Казанцев Р.В. 44
Исследование нейросетевого алгоритма голосовой биометрии
Куликов Е.Ю., Попонин А.С. 49
Итеративный способ обучения нейронных сетей для задачи распознавания речи
Попонин А.С., Куликов Е.Ю. 53
Особенности внедрения ERP-системы на авиаремонтном предприятии
Лончина А.Е. 56
Влияние качества данных на обучение нейронных сетей в задачах категоризации текста
Лосева Д.М. 60
Нейросетевая диагностическая модель стадии отделения светлых нефтепродуктов установки ЭЛОУ-АТ-6
Лукашонокс Д. 63
ПИД-управление: современное представление
Меркулов М.Д. 67
Исследование влияния инерционных свойств виртуального синхронного генератора на устойчивость системы
Мигранов Р.М., Доброскок Н.А. 69
Сравнительный анализ архитектур сверточных нейронных сетей
Новиков Е.А. 73
Анализ алгоритмов оптимизации для планирования движения и проектирования управления двуногими роботами
Огурецкий Д.В. 75
Визуализация газодинамических характеристик центробежных компрессоров
Смирнов Р.И. 78
Лабораторный стенд для исследования индуктивных датчиков перемещения
Фролова Е.А. 81
Анализ систем управления переработкой мусора
Хабаров А.В. 84

Исследование и разработка чат-ботов целевого назначения
Цыварев И.В. 86
Инновационная система промышленной регламентации малых расходов гранулированных материалов
Чернуха М., Митрошин Д.Г. 88
Разработка АСУ ТП обработки ткани кислотой
Черняева О.Ю. 92

Мобильный робот с избыточным управлением

П. В. Абрамов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
abramov-12@mail.ru

***Аннотация*. В статье рассмотрен подход к построению четырехколесного мобильного робота с избыточным управлением и проектированию для него систем управления. Даны схема и описание кинематики робота, приведена архитектурная схема системы управления нижнего уровня и предложен вариант реализации системы управления верхнего уровня с системой позиционирования на основе GPS RTK.**

Ключевые слова: мобильный робот, системы автоматизированного управления, GPS RTK

I. Введение

В последние годы часто возникает потребность в использовании роботов с повышенной мобильностью в различных, в том числе и тяжелых, условиях, в которых невозможно или нежелательно присутствие человека. Для ее удовлетворения могут отлично подойти мобильные роботы с избыточным управлением, все колеса которого могут быть ведущими и самостоятельно изменять свою ориентацию. Огромным преимуществом концепции таких роботов является их потенциальная способность продолжать выполнять поставленную задачу даже при условии выхода из строя части как колесных приводов, так и механизмов маневрирования. Причем данное свойство актуально также в условия пересеченной местности, где даже при наличии всех исправных механизмов, они могут непосредственно не влиять на движение мобильного робота ввиду не полного или отсутствия контакта с дорогой части колес.

II. Математическое описание мобильного робота

В работе разрабатывается четырехколесный мобильный робот, каждое колесо которого оснащено независимым приводным двигателем, а также рулевым сервоприводом, что позволяет расширить спектр возможных сложных маневров и отработки различных аварийных режимов, а также способы управления им. Общий вид мобильного робота описывает схема (рис. 1) [1]. Данная схема помогает решить обратную задачу кинематики для построения системы управления. Под этой задачей в данном случае понимается, что, имея исходные данные: желаемые скорость, направление движения и радиус кругового движения, необходимо определить требуемые для данного типа движения углы поворота и скорости всех 4-х колес

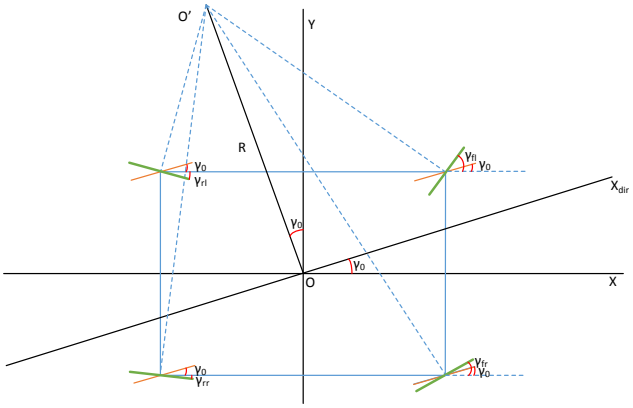


Рис. 1. Схема мобильного робота

На рисунке приведены следующие условные обозначения: (X,Y) – система координат, связанная с центром масс робота, ось X направлена по длине мобильной базы; γ_0 – угол заданного направления движения; X_{dir} – ось заданного направления движения; R – радиус вращательного движения.

Из рисунка, было показано в [1], нетрудно вывести следующие формулы для углов поворота (1) и скоростей (2) и (3) всех колес:

$$\begin{aligned}\gamma_{fl} &= atg\frac{x+L/2}{y-C/2}\\ \gamma_{fr} &= atg\frac{x+L/2}{y+C/2},\\ \gamma_{rl} &= atg\frac{x-L/2}{y-C/2}\\ \gamma_{rr} &= atg\frac{x-L/2}{y+C/2}\end{aligned} \quad (1)$$

где γ_i – угол поворота колеса, L – длина робота, C – ширина робота.

$$\begin{aligned}R_{fl} &= \left|\frac{y-C/2}{\cos\gamma_{fl}}\right|\\ R_{fr} &= \left|\frac{y+C/2}{\cos\gamma_{fr}}\right|\\ R_{rl} &= \left|\frac{y-C/2}{\cos\gamma_{rl}}\right|\\ R_{rr} &= \left|\frac{y+C/2}{\cos\gamma_{rr}}\right|\end{aligned} \quad (2)$$

где R_i – радиус вращательного движения колеса.

$$v_i = \frac{\nu R_i}{R_m} \quad (3)$$

где v_i – скорость движения колеса, R_m – максимальный радиус вращения среди всех колес.

III. Описание системы управления нижнего уровня

Можно выделить следующие узлы в составе робота:

- мотор-колеса;
- шаговые двигатели для изменения ориентации колес;
- вычислительный модуль нижнего уровня на базе микроконтроллера;
- датчики обратной связи по углу поворота колес;
- модули управления электроприводами;
- вычислительный модуль верхнего уровня на базе ноутбука.

Все составляющие крепятся на единой металлической раме. Питание систем мобильного робота обеспечивается аккумуляторными батареями и DC-DC преобразователями. Важной дополнительной составляющей является поводок безопасности, который позволяет произвести экстренную остановку робота при возникновении нештатных ситуаций.

Было принято решение организовать систему управления нижнего уровня на базе бесплатной операционной системы реального времени FreeRTOS. Структура программного обеспечения и потоки данных показаны на рис. 2.

В качестве драйвера мотор-колес использовались платы инверторы на базе микроконтроллеров STM32G431CB с ядром Cortex-M4 и трехфазных мостовых схемах на MOSFET транзисторах.

Драйвер бесщеточного двигателя реализует блок векторного управления, с регуляторами по току, моменту и скорости, которые настраивались под выбранный тип двигателей.

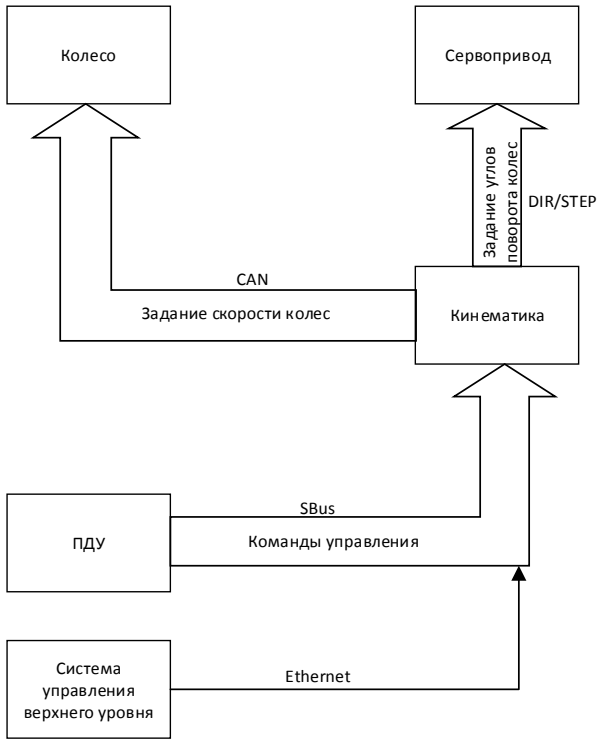


Рис. 2. Структура программного обеспечения нижнего уровня

В ходе исследования качества работы системы управления драйвера было принято решение в качестве альтернативного метода регулирования заменить ПИД-регулятор внешнего контура управления по скорости на нечеткий логический регулятор ПД-типа [2, 3]. Сравнение графиков переходных процессов приведено на рис. 3.

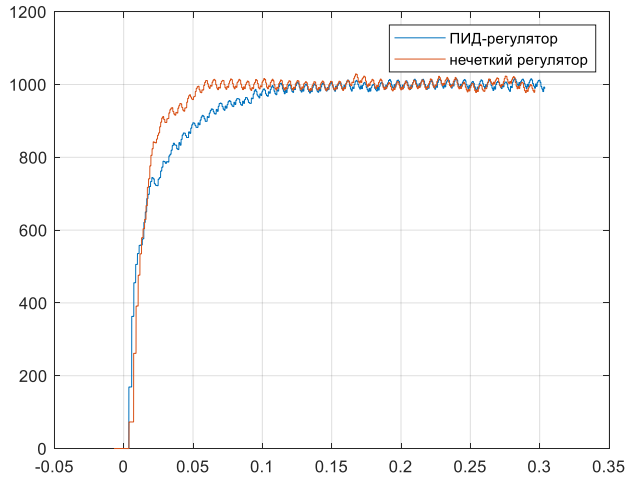


Рис. 3. Сравнение регуляторов

IV. Описание системы управления верхнего уровня

Существует несколько способов реализации системы управления верхнего уровня. Для данного робота была выбрана следящей системы с обратной связью по положению мобильного робота. Положение центра, ориентация и скорость мобильной базы определяются по встроенной системе GPS RTK на базе приемника NEO-M8P [4]. Данный способ наиболее эффективен на больших открытых участках пространства. Однако «минус» этого метода связан с тем, что он требует дополнительное оборудование в виде базовой навигационной станции, излучающей дифференциальные поправки к псевдодальностям спутников.

Для системы на базе GPS RTK было разработано программное обеспечение, которое осуществляет прием и обработку навигационной информации по интерфейсу, описанному в [5], способно отображать данные на навигационных картах и передавать команды на систему управления нижнего уровня по интерфейсу Ethernet. Основное окно программы показано на рис. 4.

В программном обеспечении предусмотрены функции задания роботу путевых точек и отслеживания его перемещения. Для исследования траекторного движения робота и идентификации ряда его параметров была также добавлена возможность сохранения измеренных данных.

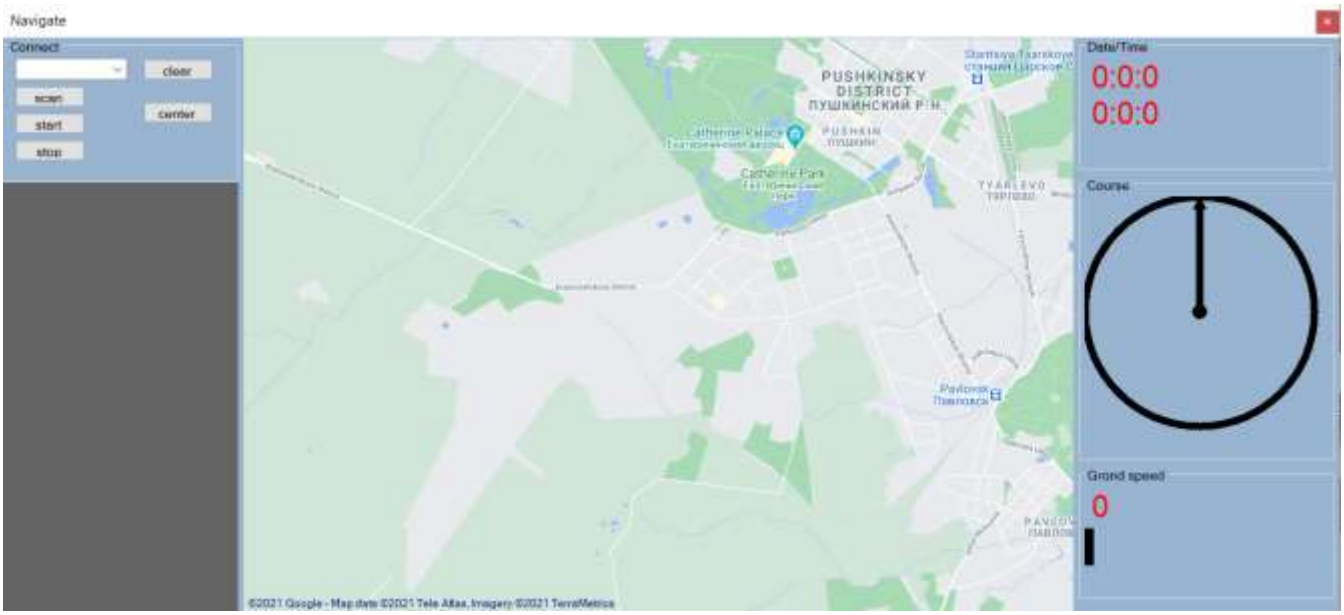


Рис. 4. Основное окно программы

V. Заключение

В данной работе представлено описание общей архитектуры спроектированного мобильного робота с избыточным управлением, дано описание микроконтроллерной систем управления нижнего уровня и отдельно выделены системы управления электроприводами на базе драйверов. Описана реализация системы автономного управления верхнего уровня, основанной GPS RTK системы для получения высокоточных координат положения, скорости и курса робота.

В ходе дальнейшей работы планируется разработка и внедрения систем управления верхнего уровня, основанных на других принципах получения собственного местоположения, сравнение различных систем и их объединения для решения различных комплексных задач.

Список литературы

[1] Filatov D.M. «Trajectory Motion Simulation of a Mobile Robot» // ElConRus, 2021.

[2] Бураков М.В., Коновалов А.С. «Синтез нечетких логических регуляторов» // Информационно-управляющие системы №1, 2011, с.22-27.

[3] Калниболотский Ю.М., Короткий Е.В. «Креативные методы нечеткого моделирования» // Информационные системы и технологии, Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии», ч.2, 2009, с. 297-302.

[4] U-blox: C94-M8P|ublox. [Электронный ресурс] – URL: https://www.u-blox.com/en/product/c94-m8p. Дата обращения: 13.09.2021.

[5] U-blox: Interface Manual. [Электронный ресурс] – URL: https://www.u-blox.com/en/ubx-viewer/view/u-blox8-M8_ReceiverDescrProtSpec_UBX-13003221?url=https%3A%2F%2Fwww.u-blox.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdocuments%2Fu-blox8-M8_ReceiverDescrProtSpec_UBX-13003221.pdf. Дата обращения: 13.09.2021.

Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро

А. В. Андреев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
a-sanya01@mail.ru

***Аннотация*. Представлена работа очистной системы производственного типа, а также освещаются основные проблемы, возникающие в ходе технологического процесса. Особо отмечаются те проблемы, которые на сегодняшний день требуют решения.**

Ключевые слова: вода; очистка; резервуар; фугат; известь; декантер; флокулянт

I. Введение

Все человеческие поселения имеют тенденцию располагаться в близости от пресных водоёмов, используемых для питьевых, гигиенических, сельскохозяйственных и производственных целей. Однако в процессе использования воды она нередко становится опасной в санитарном отношении. Также не следует забывать, что со временем развития промышленности пресная вода стала ещё более значимой как природное сырьё. В результате подобного использования вода загрязняется веществами минерального и органического происхождения. Такую воду называют сточной [1].

Разумеется, сточную воду необходимо отводить, однако возвращение её в природу загрязнённой недопустимо, поскольку такая вода может навредить как экологии района, так и стать в дальнейшем непригодной к использованию в тех же самых бытовых или промышленных задачах. Для решения данной проблемы и были созданы различные системы очистки, которые позволяют очищать сточные воды. Однако при использовании систем очистки на практике возникают определённые трудности, которые требуют устранения.

II. Работа системы очистки

Поскольку данные проблемы проявляются на практике, то следует рассмотреть конкретный пример системы очистки. В качестве объекта изучения рассматривается животноводческий комплекс ИДАВАНГ по выращиванию свиней. Такое производство сопровождается образованием большого количества сточных вод, требующих переработки. Сам процесс очистки сточных вод условно разделяется на два этапа: первый этап – непосредственно очистка сточных вод, выделение осадка из стоков и получение осветленного фугата; второй этап – доочистка осветленного фугата путём удаления из него посредством выпаривания растворенного аммонийного азота и приведения его концентрации до предельно-допустимых норм (ПДК).

III. Очистка сточных вод

Для удобства на рисунке ниже приведена схема работы очистных предприятий.

Для начала все стоки самотеком поступают от всего свиноводческого комплекса в приемный резервуар. Сам резервуар подземный, имеет объём 2000 м^3 и выполнен из бетона для защиты земли от загрязнений. В резервуаре установлены погружные горизонтальные миксеры с целью поддержания стоков в однородном состоянии, и избегания выпадения осадка. Наземная часть приёмного резервуара – одноэтажное здание, располагающее техническим оборудованием резервуара и электрощитами управления данным оборудованием. Для подъёма стоков и подачи их на очистку в приемном резервуаре установлены два погружных насоса. Далее, прокачка стоков из приемного резервуара производится через пропиленовые трубы диаметром 100 мм, которые проложены под землей от приемного резервуара до помещения предварительной фильтрации, находящимся в другом здании. Каждый насос прокачивает стоки по своему трубопроводу. Сам запуск в работу технологического оборудования производится автоматически с пульта оператора, однако непосредственно в приемном резервуаре предусмотрены аварийные выключатели, которые также используются при необходимости проведения ремонтных работ.

Затем стоки поступают на предварительную фильтрацию – выделение из стоков всевозможных механических примесей, которые губительны для оборудования иных процедур очистки. Из приемного резервуара стоки подаются на механический фильтр, который представлен открытым прямоугольным баком, внутри которого установлена фильтрующая решётка и шарнирно закрепленный гидравлический цилиндр, на штоке которого установлен скребок, имеющий вид «расчески», зубцы которой располагаются между прутками фильтрующий решетки. Таким образом, достаточно крупные механические примеси оседают на решетке, а стоки проходят сквозь нее, и скребок счищает решетку, сбрасывая мусор по лотку на тележку. После очистки от крупных примесей стоки поступают в буферную емкость с миксером, который перемешивает их, делая более однородными, чем уменьшает вероятность выпадения осадка из прокачиваемых стоков и

блокирования выходного патрубка из емкости. Сам миксер включается автоматически по получению сигнала от датчика нижнего уровня. Насос же, поставляющий стоки в данную ёмкость, имеет возможность настройки параметров через SCADA-систему. Так, насос включается автоматически, когда уровень достигает минимального установочного уровня.

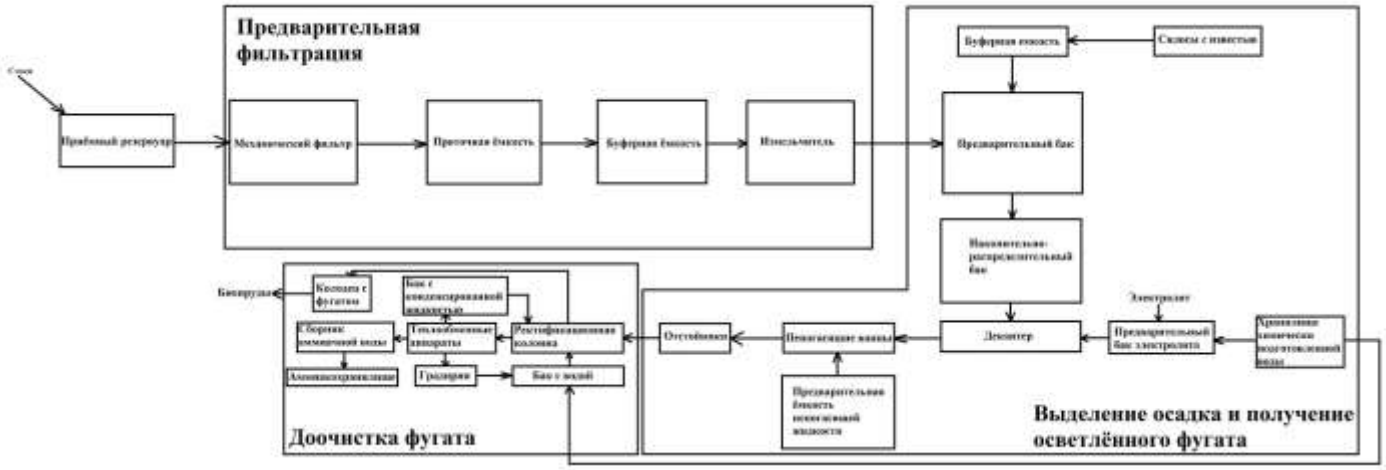


Рис. 1. Схема работы очистных предприятия

IV. Процесс выделения осадка и получение осветленного фугата

Затем стоки проходят процесс осушки осадка и доочистку в ректификационной колонне.

Для начала в предварительном баке происходит смешивание стоков с негашеной известью. Дозировка извести производится автоматически согласно объёмной доли дозировки, определяемой оператором на основании проведённых экспресс анализов водородного показателя (pH) стоков. Дозировка извести необходима, чтобы стоки стали высокощелочной средой, в которой растворенный в стоках аммонийный азот представлен в состоянии NH3, имеющий более низкую температуру кипения, следовательно, азот можно выделить в ректификационной установке и очистить фугат. Важный факт данной стадии – выделение аммиака в атмосферу здания. Несмотря на то, что на предприятии предприняты все меры по защите людей от аммиачного воздействия и отсутствуют случаи аварий, аммиак всё равно загрязняет технику. В результате может теряться управление или определённым узлом, или всей техникой по прошествии времени. В последнем случае понятно, что при длительном исправлении проблемы придётся приостановить все процессы очистки и даже производства, ведь стокам некуда идти – следующая часть производства вышла из строя, а все резервуары заполнены. На самом предприятии подобные случаи отсутствуют в виду наличия опытных кадров, которые успевают выявлять и исправлять проблемы достаточно быстро, однако вероятность долгого простоя всё же возможна.

Известь храниться в двух силосах, объёмом по 25 $м^3$ каждый. Из силосов известь автоматически загружается в буферную силосную ёмкость. Во время загрузки известь подпрессовывается и может заклинить винтовой конвейер, для исключения чего на конвейерах установлены вибраторы с электроприводом. Также к каждому силосу подведен сжатый воздух, подающийся во время разгрузки от компрессорной установки, чтобы известь в силосах не слеживалась. Каждый силос оборудован тензометрическими датчиками, при помощи которых измеряется реальный вес извести в каждом силосе, соответствующий сигнал выводится на пульт оператора. Силосы пополняются из автотранспорта. Загрузка идёт попеременно с помощью винтовых конвейеров, сначала с одного силоса, затем с другого. Из буферной силосной ёмкости известь дозируется с помощью шнекового конвейера в предварительный бак со стоками, где происходит перемешивание с помощью миксера, включающегося автоматически. Сигнал на запуск миксер получает от датчика нижнего уровня. Если уровень стоков ниже датчика, миксер отключается и включается насос и начинается подпитка бака. Разумеется, во избежание перелива в баке присутствует датчик верхнего уровня, отключающий насос.

Затем предварительно смешанные стоки и известь с помощью центробежного насоса загружаются в накопительно-распределительный бак. Насос производит подпитку бака автоматически согласно настройкам оператора порога включения и отключения. Разумеется, в баке присутствуют датчики нижнего и верхнего уровня, отвечающие за включение/отключение подпитки, а также присутствует датчик объёма для визуального контроля фактического уровня. Также в баке установлен миксер с приводом через мотор-редуктор, притом на валу миксера имеются два трехлопастных винта, то есть перемешивание ведётся практически по всему объему бака. Миксер включается по сигналу от датчика нижнего уровня. Под самим баком установлены два насоса, которые питают декантерные центрифуги. Таким образом, насосы подают стоки непосредственно в декантер, где под действием центробежных сил происходит отделение осадка (осушка)

и осветление фугата, то есть удаление из жидкости растворенных в ней примесей (флоккул).

Следует отметить, что без декантерных центрифуг невозможен процесс осушки осадка и дальнейшей доочистки фугата. Сами декантеры используются для сепарации фаз с разным удельным весом, в частности для осветления жидкостей, содержащих твёрдые взвеси. Сепарация фаз производится внутри вращающегося барабана. Барабан сам состоит из отрезка, имеющего цилиндрическую форму и отрезка в форме усеченного конуса, на дне которой оседает наиболее тяжелая фаза, которая непрерывно выгружается посредством внутреннего шнека. В сами стоки, подаваемые в декантер, подмешивается полиэлектролит (флокулянт), выбранный в соответствии с типом и характеристиками продукта с целью оптимизации процесса сепарации твердой и жидкой фаз. Флокулянт способствует соединению и, следовательно, выпадению в осадок твёрдых частиц. Раствор флокулянта подготавливается в полимерной установке, а затем готовый раствор дозируется винтовыми насосами из распределительной ёмкости в нагнетательную трубу после насосов, отвечающих за транспортировку стоков, непосредственно до подачи стоков в декантер.

Так, подготовка флокулянта и засыпка производится оператором вручную, перекачка готового флокулянта, его дозировка, доливка воды и перемешивание идёт в автоматическом режиме. Сам флокулянт после засыпки подготавливается в предварительном баке объёмом 3 м^3. В пустой бак через электромагнитный клапан начинает поступать чистая вода. Так, для приготовления флокулянта с концентрацией 0.1 % требуется 2500 литров воды. После того как бак будет наполнен водой, оператор высыпает один мешок флокулянта (25 кг). Сама концентрация задаётся менеджером по производству. В виду особенностей химических процессов флокулянт при засыпке поступает в воронку, которая представлена в виде пирамиды и помещена в верхний лаз бака вершиной вниз. На вершине воронки сделан излет, через который порошкообразный флокулянт тонкой струёй дозируется в воду и перемешивается. Кроме того, к излёту подведён сжатый воздух от компрессорной установки для лучшего дозирования флокулянта. Разумеется, в баке предусмотрен датчик для визуального контроля объёма с пульта оператора. Также в нём установлен миксер, производящий перемешивание флокулянта на протяжении всего процесса приготовления и перекачки его в распределительный бак объёмом 4 м^3. Перекачка готового флокулянта в данный бак производится с помощью винтового насоса. Из него же флокулянт дозируется в обрабатываемые стоки методом, указанным ранее. Собственно, при попадании в декантер флокулянта, растворённые ранее в стоках твёрдые частицы выпадают в осадок, который удаляется с помощью винтовых конвейеров в телеги, выводящиеся тракторами на специальную площадку хранения.

Однако, осушка осадка производится под действием центробежных сил и на высоких угловых скоростях из-за чего фугат сильно пенится на выходе декантеров. Для подавления пенообразования установлены ванны для пеноразделения и пеноотведения, и дозировки поверхностно активных веществ (ПАВ) для гашения пены. В каждой ванне имеется ленточный конвейер с транспортерной лентой из фильтрующего материала (лента с перфорацией). Таким образом, сама лента и является пеноразделителем и пеноотводчиком. Так, фугат после обоих декантеров попадает в первую ванну и, проходя сквозь ленту, скапливается в нижней части ванны, откуда откачивается центробежным насосом во вторую ванну, где проходит ту же процедуру и откачивается роторным насосом в отстойники. Сама пена задерживается на транспортерной ленте и отводится в расположенный под декантерами винтовой конвейер, где смешивается с осушенным осадком. Причина наличия двух ванн вместо одной обусловлена лучшим удалением пены. Притом ленту необходимо периодически промывать с помощью мойки высокого давления, иначе сцепление транспортерной ленты с пеной со временем утратится, в результате чего пена будет оставаться в ванне с риском подмешивания в фугат. Следовательно, необходимо помнить о необходимости периодического промыва ленты в ваннах. Кроме самого вышеописанного процесса для уменьшения пенообразования после ванн к мембранно-дозировочным насосам через фильтр подаётся пеногасящая жидкость, которая затем через систему пластиковых трубок попадает в запитывающие трубы каждого из декантеров.

Как было сказано ранее, профильтрованный фугат затем поступает в отстойники (всего их три). Сам процесс управляется оператором на пульте управления. Отстойники представляют собой резервуар, выполненный из бетона объёмом более 300 м^3, дно выполнено в виде конуса, в центре которого – отверстие, к нему приварена труба с фланцами, на которой установлен автоматический клапан, сквозь которые через заданные промежутки времени производится сброс осадка, который затем через систему дренажных каналов попадает в ёмкость с системой камер-отстойников, по прохождению которых тяжёлые частицы осаждаются на дно ёмкости. На каждом из отстойников установлены следующие приборы контроля: датчик загрязнённости, позволяющий дистанционно оценивать состояние фугата и наличие осадка; датчик объёма, позволяющий дистанционно оценивать реальное заполнение отстойника. Датчики посылают соответствующие сигналы на SCADA-систему. Кроме того, имеющиеся первый и второй отстойники соединены между собой трубопроводом и могут работать как сообщающиеся сосуды. Таким образом, поступая в центр первого отстойника, фугат самотёком перетекает во второй отстойник и далее, посредством насоса перекачивается в третий отстойник. Также через данный насос предусмотрена возможность подачи фугата из первого и второго отстойника на установку выпаривания. Третий отстойник представляет собой прямоугольную ёмкость с коническим дном и объёмом примерно 2700 м^3. В ней фугат проходит последнюю стадию отстаивания осадка перед выпариванием, но возможность удаления осадка в данной ёмкости не предусмотрена, потому её необходимо 1–2 раза в год механически очищать. Сам фугат откачивается погружным насосом на установку выпаривания.

V. Процесс доочистки фугата

Процесс удаления растворённого в фугате аммонийного азота производится выпариванием в ректификационной установке – аппарате, предназначенным для разделения жидких смесей, имеющих различную температуру кипения. Ректификация – тепломассообменный процесс, в результате которого конденсация составляющих пара происходит раздельно [2].

Насос, расположенный в третьем отстойнике загружает отстоянный фугат через один из теплообменных аппаратов «вода-вода» в верхнюю часть нижней камеры ректификационной колонны. В противоположном направлении подаваемому из отстойников потоку фугата, через теплообменные аппараты с помощью центробежного насоса из нижней части ректификационной установки прокачивается уже доочищенный фугат, который охлаждается, проходя через теплообменник, отдавая избыточную теплоту фугату недоочищенному. Массотеплообменный процесс происходит с помощью колец Палля. В верхней камере кольцо имеет диаметр 35 мм, в нижней – 50 мм. Сами кольца являются насыпными массообменными элементами цилиндрической формы. Протекая сквозь них, фугат продолжает нагреваться. В процессе данного нагрева аммонийный азот, растворенный в фугате, имея более низкую температуру кипения, начинает испаряться и его пары поднимаются вверх. Фугат же дойдя до нижней части нижней камеры смешивается с уже очищенным фугатом. Далее часть жидкости с помощью одного насоса прокачивается через теплообменник, охлаждаясь и отдавая тепло фугату из отстойника и переходя ко второму насосу, а другая часть сразу с помощью второго насоса прокачивается через теплообменные аппараты «пар-вода», где нагревается от циркулирующего по второму контуру теплообменника пара и закачивается обратно в нижнюю часть колонны. Рабочая температура нижней части колонны находится в диапазоне 100–102 градуса Цельсия. Пар на сами теплообменные аппараты подаётся от паровых котлов, которые располагаются в производственно-отопительной котельной. Отработанный пар собирается в конденсатном баке, откуда откачивается в деаэратор, расположенный в здании котельной.

В среднюю часть нижней камеры ректификационной колонны для улучшения массотеплообменного процесса подаётся свежий пар. С одной стороны, это приводит к потерям пара, а с другой – значительно увеличивает выпаривание аммонийного азота, особенно на стадиях работы, когда кольца Палля значительно загрязняются известковыми отложениями.

Проходя через кольца Палля верхней части ректификационной колонны происходит окончательное выпаривание аммонийного азота из фугата. Поскольку температура кипения у аммиака и воды разная, то подаваемая из бака насосом вода на доочистку несколько сбивает температуру в верхней точке ректификационной колонны, тем самым вода и не выпаренный из нее аммонийный азот увлекаются вниз, где снова нагреваются и в виде паров начинают снова свой подъём. Температура в верхней части ректификационной колонны варьируется в пределах 97–100 градусов Цельсия. Пары аммонийного азота всё равно продолжают свое восхождение вверх, а затем по трубе ниспадают на первичную конденсацию в теплообменном аппарате. Жидкость, которая полностью конденсировалась в нём, попадает далее в бак, откуда обратно в верхнюю часть верхней камеры ректификационной колонны. Пары, которые не конденсировались в теплообменном аппарате поступают в соседний теплообменный аппарат, где окончательно конденсируются, и получается аммиачная вода, в идеале 25 %, но из-за обильного выпадения в осадок извести и иных видов веществ процент концентрации будет отличаться. Затем вся аммиачная вода накапливается в сборной емкости, откуда насосом откачивается в аммиакохранилище.

Следует отметить, что для процесса конденсации используется химически подготовленная пресная вода, находящаяся в расходном баке. При понижении уровня в нём вода будет автоматически пополнена от станции. Вода прокачивается через теплообменные аппараты, после чего охлаждается в градирне и возвращается в бак. Для уменьшения потерь тепла на градирне, вода на выходе теплообменных аппаратов направляется в рекуперативный теплообменный аппарат, где вода дополнительно охлаждается, отдавая избыточную температуру воде, которая циркулирует в системе отопления свиноводческого комплекса.

Весь же доочищенный фугат из ректификационной установки поступает в колодец насосной станции, откуда он откачивается на биопруды.

VI. Заключение

В результате анализа работы очистных на предприятии ИДАВАНГ можно сделать следующие выводы:

- Наличие аммиака пусть и не оказывает значительного негативного влияния на людей в виду принятых правил безопасности, но негативно влияет на технику и выводит её из строя.
- С целью устранения такого недостатка и уменьшению вероятности простоя очистных требуется разработать математические модели элементов системы и разработать систему управления, способную повысить качество работы путём уменьшения влияния аммиака на технику.

Список литературы

[1] Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 704 с.

[2] Лаптев А.Г., Конахин А.М., Минеев Н.Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей: учеб. пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2007. 426 с.

Генерация иерархических моделей регулярных микроэлектронных объектов

Л. Е. Андреев[1], К. М. Зибарев[2], А. Д. Милакин[3], С. Э. Миронов[4]
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
[1]l.andreev90@gmail.com, [2]zib1995@mail.ru,
[3]milakins.s98@gmail.com, [4]semironovspb@yandex.ru

***Аннотация*. Описан процесс разработки средств программной генерации двумерных иерархических геометрических моделей трехмерных регулярных микроэлектронных объектов, реализуемых в соответствии с принципами пространственной реализации алгоритмов. Описание иллюстрируется примером разработки специализированного кремниевого компилятора конвейерного матричного делителя с использованием оригинальных методов и средств управления процессом иерархического сжатия топологии.**

Ключевые слова: иерархические геометрические модели; иерархическое сжатие топологии; управление процессом сжатия; пространственная реализация алгоритма; конвейерный матричный делитель

I. Управляемая программная генерация параметризированных моделей микроэлектронных систем

Рост сложности технических систем и ужесточение требований к срокам их разработки привели к созданию методов, упрощающих и ускоряющих проектирование. В микроэлектронике для этого разрабатывают не топологические чертежи (точные 2-мерные геометрические модели сложных 3-мерных конструкций, расположенных как на кристалле, так и внутри него), а лишь топологические эскизы (упрощенные модели микроэлектронных систем). Топологические эскизы с помощью систем сжатия топологии [1], [2] можно быстро настраивать на требуемые проектные нормы.

В процессе адаптации к проектным нормам использованная автором оригинальная система «*Matching of Cells*» иерархического проектирования топологии [3] осуществляет управление процессом сжатия с целью согласование множества коррелированных компонентов микроэлектронной системы (ячеек реализуемого устройства) по габаритам и расположению выводов. Помимо проектных норм система позволяет параметризировать и другие характеристики схем: электрические (ширину и длину канала транзисторов), структурные (разрядность операндов и результата).

В результате система «*Matching of Cells*» генерирует 2-мерную геометрическую модель сложного микроэлектронного объекта – топологический чертеж иерархического фрагмента БИС. В данной работе в качестве такого фрагмента выступает конвейерный матричный делитель (КМД).

II. Структурно-топологическая оптимизация иерархической модели микроэлектронного объекта

Микроэлектронные объекты с неоднородной структурной организацией разрабатываются методом размещения и трассировки входящих в их состав типовых компонентов. Что касается регулярных объектов, то они строятся из заказных специализированных компонентов, оптимизированных под конкретный иерархический микроэлектронный объект со строго определенной структурно-топологической организацией, которая обеспечивает сокращение аппаратных затрат на их реализацию.

Разработка средств программной генерации топологических чертежей начинается со структурно-топологического исследования, в ходе которого в соответствии с идеологией пространственной реализации алгоритма разрабатывается структурно-топологическая модель проектируемого иерархического микроэлектронного объекта.

Структурно-топологическая модель конвейерного матричного делителя, построенная в соответствии с идеологией пространственной реализации алгоритма, представлена на рис. 1.

Суть пространственной реализации алгоритма состоит в том, что каждая операция выполняется на отдельном блоке устройства, используемом в процессе вычисления единожды. Поэтому структурно-топологическая модель матричного делителя соответствует последовательности выполняемых при делении действий. Необходимые сдвиги организуются с помощью соответствующей разводки выводов ячеек.

Поскольку каждое действие алгоритма выполняются на отдельном блоке, то матричные вычислительные устройства занимают на кристалле большую площадь.

В связи с этим исходную структурно-топологическую модель следует подвергнуть оптимизации в соответствии с принципами, изложенными в [4].

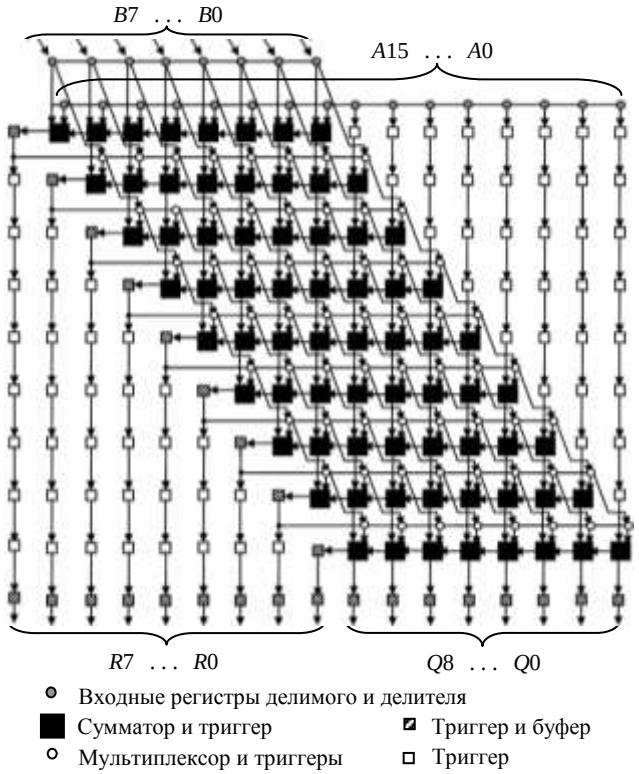


Рис. 1. Исходная структурно-топологическая модель конвейерного матричного делителя

Используя описанные в [4] структурно-топологические приёмы, можно сократить площадь матричного делителя на 25–30 процентов благодаря перегруппировке разряженных областей, занимаемых конвейерными триггерами, так, как показано на рис. 2.

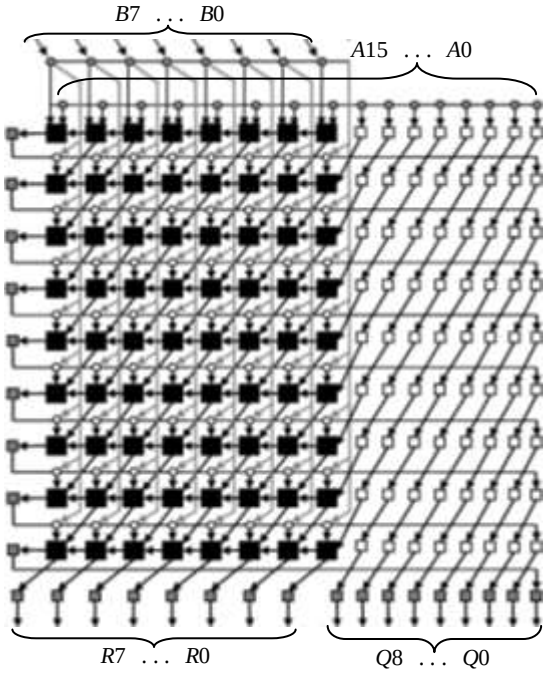


Рис. 2. Оптимизированная структурно-топологическая модель конвейерного матричного делителя

После выбора окончательного варианта структурно-топологической модели реализуемого объекта разрабатывается его абстрагированное от проектных норм иерархическое описание, параметризированное по разрядности операндов и результата.

III. Иерархическое описание микроэлектронного объекта

Описание микроэлектронного объекта включает в себя описание его иерархической структурно-топологической модели и ее компонентов.

С целью абстрагирования от конкретных проектных норм описание иерархической модели, называемое спецификацией макроблока, задает лишь состав и относительное взаимное расположение компонентов микроэлектронного объекта, задаваемое очередностью перечисления их в структурных компонентах более высокого уровня иерархии.

В приведенном ниже примере в качестве таких компонентов выступают строки «*S*1» и «*S*2» – два типа подмножеств иерархической модели, ориентированных горизонтально (пространственная ориентация задается символом «*g*», следующим после имени подмножества). После индикатора ориентации перечисляются имена компонентов более низкого уровня иерархии (ячеек) с указанием их коэффициентов матрицирования.

S1 :g str1_1 str1_1 , 1 ; str1_2 str1_2 , 1 ; str1_3 str1_3 , 2 ; str1_4 str1_4 , 1 ; str1_5 str1_5 , 1 ; str1_6 str1_6 , 1 ; EOL

S2 :g str1_1 str1_1 , 1 ; str1_2 str1_2 , 1 ; str1_3 str1_3 , 2 ; str2_4 str2_4 , 1 ; str2_5 str2_5 , 1 ; str2_6 str2_6 , 1 ; EOL

DividerCONV :v S1 , 1 ; S2 , 16 ; EOL.

За спецификациями строк «*S*1» и «*S*2» следует спецификация собственно макроблока «*DividerCONV*», так же состоящая из индикатора пространственной ориентации (символ «*v*») и списка имен и коэффициентов матрицирования компонентов макроблока (строк «*S*1» и «*S*2»).

Абстрагированные от проектных норм виртуальные геометрические модели компонентов нижнего уровня иерархии (топологические эскизы ячеек макроблока) разрабатываются с учетом особенностей их включения в состав компонентов более высокого уровня с помощью системы сжатия топологии ячеек интегральных схем «*TopDesign*» [5].

При переходе от абстрактной топологической модели макроблока к его иерархической геометрической модели в требуемых проектных нормах средствами системы «*Matching of Cells*» осуществляется управляемое сжатие топологии.

Для согласования компонентов нижнего уровня по габаритам и расположению выводов с учетом вектора параметров конкретного технологического процесса для системы «*Matching of Cells*» средствами оригинальной программы «*Parse*» подготавливаются спецификации ячеек, описывающие расположение их границ и выводов.

В рамках САПР «*Matching of Cells*» предусмотрены действия по верификации исходных данных, а именно:

- проверка спецификаций ячеек;
- проверка корректности наборов согласуемых выводов ячеек;
- мониторинг библиотек ячеек на наличие файлов описания виртуальной топологии (технологически инвариантных описаний топологии ячеек библиотеки);
- анализ корректности структурно-топологического описания макроблоков.

В качестве иллюстрации к изложенному материалу на рис. 3 приведен пример результата перехода от абстрактной параметризированной виртуальной модели конвейерного матричного делителя к его топологическому чертежу – его 2-мерной геометрической модели, построенной с учетом заданных векторов конкретных значений структурных и технологических параметров.

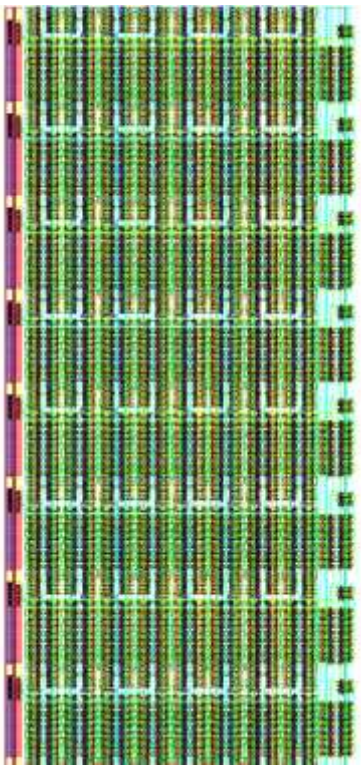


Рис. 3. Пример результата генерации иерархического описания регулярных микроэлектронных объектов – топологический чертеж конвейерного матричного делителя

IV. Заключение

В статье на примере конвейерного матричного делителя описан процесс разработки средств программной генерации двумерных иерархических геометрических моделей трехмерных регулярных микроэлектронных объектов, предполагающий выполнение следующих действий:

- разработка структурно-топологической модели иерархического микроэлектронного объекта в соответствии с идеологией пространственной реализации алгоритма;
- разработка абстрагированного от проектных норм иерархического описания микроэлектронного объекта, параметризированного по разрядности операндов и результата;
- настройка абстрактного виртуального описания микроэлектронного объекта на требуемые проектные нормы с помощью программных средств управляемого сжатия топологии.

В качестве направления для дальнейшего развития авторами рассматриваются:

- автоматизация процесса построения абстрактной структурно-топологической модели иерархического микроэлектронного объекта [6];
- оптимизация процесса перехода от абстрактного виртуального описания микроэлектронного объекта к конкретным 2-мерным геометрическим моделям с учетом заданных векторов конкретных значений структурных и технологических параметров [7].

Список литературы

[1] Sherwani Naveed A. Algorithms for VLSI physical design automation - 3. print. Boston etc.: Kluwer Academic Publishers, 2002. 488 p., ISBN 0-7923-9294-9.

[2] Bamji C., Varadarajan R. Leaf Cell and Hierarchical Compaction Techniques, New York – Springer Science & Business Media, LLC, Dec 6, 2012 - Technology & Engineering. 161 p., DOI 10.1007/978-1-4615-6139-2.

[3] Mironov S.E., Vasiliyev A.Yu., Safyannikov N.M. Means Of Automating The Hierarchical Design Of Complex Microelectronic Circuits With Uncertainty Of Design Rules // Problems of advanced micro- and nanoelectronic systems development (MES). SELECTED ARTICLES of the VIII All-Russia Science&Technology Conference MES-2018. Moscow: FSFIS Institute for Design Problems in Microelectronics RAS. 2019. Pages 7-13. DOI: 10.31114/2078-7707-2019-1-7-13.

[4] Миронов С.Э., Сафьянников Н.М., Фролкин А.К. Методика структурно-топологической оптимизации регулярных макроблоков СБИС // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. Вып. 1. С. 17–23.

[5] I.S. Zuev, A. Maximov, “High-Density Layout Designing of CMOS VLSI Parameterized Fragments”, Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’10), pp. 131–134. 2010.

[6] Миронов С.Э., Андреев Л.Е., Зибарев К.М. Технология комплексной параметризации топологических проектов регулярных макроблоков СБИС // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем»: Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. Зеленоград, 05–08 октября 2020 г. М.: ИППМ РАН, 2020. Выпуск III. С. 35-40. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-3-35-40

[7] Миронов С.Э., Зибарев К.М Управление топологическим согласованием объектов сложных микроэлектронных систем при неопределенности проектных норм // Материалы III международной научной конференции по проблемам управления в технических системах (CTS'2019). Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019 г., 30 октября – 1 ноября, с. 198-201.

Системно-аналитические исследования городской электросети на основе современных информационных технологий

А. С. Арамян
Санкт-Петербургский горный университет
s202786@stud.spmi.ru

В. В. Антропова
Санкт-Петербургский горный университет
antropovav98@yandex.ru

***Аннотация*. В проведенной работе представлена теоретическая часть, которая включает: анализ объекта исследования; описание значения исследования параметров электросети города; включает один из наиболее важных способов посредством системного мониторинга и анализа в системе Scada MasterScada. Кроме того, представлено практическое задание, изученное в программе MS Excel.**

Ключевые слова: электроеть; электроэнергия; показатели электросети; электростанция; системный анализ; линейное программирование; MS Exel; Scada-система

I. Анализ объекта исследования

Электричество является одним из основных направлений энергоснабжения и обеспечивает экономическую электрификацию. Невозможно представить стабильное и непрерывное развитие экономики без развития энергетического сектора.

A. Основные понятия и законы управления электрической энергией

Физический термин «Электричество» в промышленности и в повседневной жизни для определения количества электроэнергии, которую источник питания вырабатывает или потребитель получает от сети. [1]

Электричество обладает важнейшими свойствами, позволяющими широко использовать его:

- распространение среди потребителей. С появления возможности передачи необходимых ресурсов до потребителя с разными «требованиями»;
- междугородняя транспортировка. Электроэнергия транспортируется по высоковольтным линиям без значительных потерь;
- простое производство. В мире действует большое количество различных генераторов (альтернативных и традиционных).

B. Важность электричества в мировом масштабе

В настоящее время энергоресурсы являются основой развития национальных рынков. Темпы развития энергетического сектора превышают темпы развития других отраслей.

Отличительной особенностью электрической энергии считается то, что её невозможно накопить для дальнейшего использования.

Промышленная электроэнергия используется для работы различных механизмов, а также в технологическом процессе работы современных средств связи. Без этого развитие кибернетики, вычислительной техники и космической техники невозможно. [2]

Транспортный сектор также не может обойтись без электрификации. Одним из важных преимуществ является эко логичность использования электроэнергии в качестве топлива. Вследствие внедрения электрификации в данную отрасль, также отмечается разгрузка транспортной сети, что благополучно влияет на экономику, так как происходит снижение расходов на топливо при её большем расходе.

II. Мониторинг электросети

Существенные отклонения показателей мощности от нормативных значений возникают в связи с текущими изменениями в структуре энергопотребления, массовым внедрением устройств управления нагрузкой и электротехнических устройств с быстро меняющимися несимметричными нагрузками.

A. Значение мониторинга парметров электросети

Неисправности могут привести к изменению режимов работы электрических сетей, увеличению потерь электроэнергии, увеличению количества отказов электрооборудования, нарушению технологических процессов потребителей электроэнергии и возникновению взаимных претензий к организациям, поставляющим электроэнергию и электроэнергию.

Мониторинг и прогнозирование возможных аварий и критических аномалий становятся сложными, поскольку информационные технологии постоянно развиваются, а объем сетей и информационных моделей увеличивается.

III. мониторинг и анализ в системе MasterScada

Системы SCADA были разработаны для мониторинга и учёта большого количества удаленных или географически распределенных мест. Электросеть как раз относится к данной структуре. [3]

A. Описание информационной модели учёта парметров электросети

Информационная модель будет описывать функциональную модель разрабатываемой автоматизированной системы управления мониторинга параметров электросети в качестве, предоставляет её важнейшие компоненты, их взаимосвязи и функции.

Предоставленная диаграмма описывает взаимосвязь функционирования разработанной АСУ ТП с внешней средой. [4]

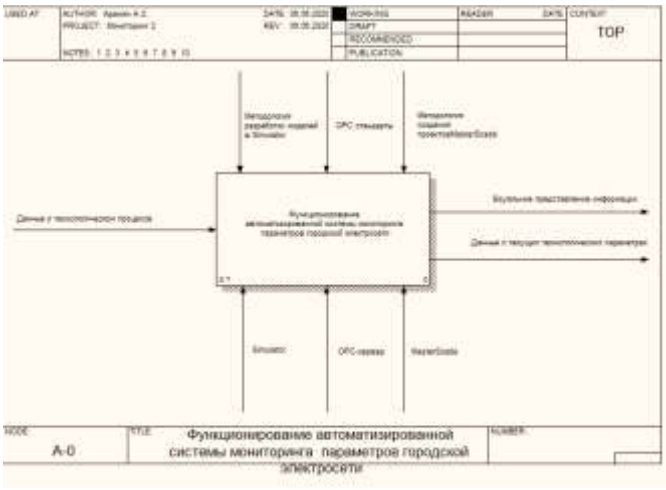


Рис. 1. Диаграмма №1

На первом уровне представлена схема структуры функционирования, состоящая из трех блоков.

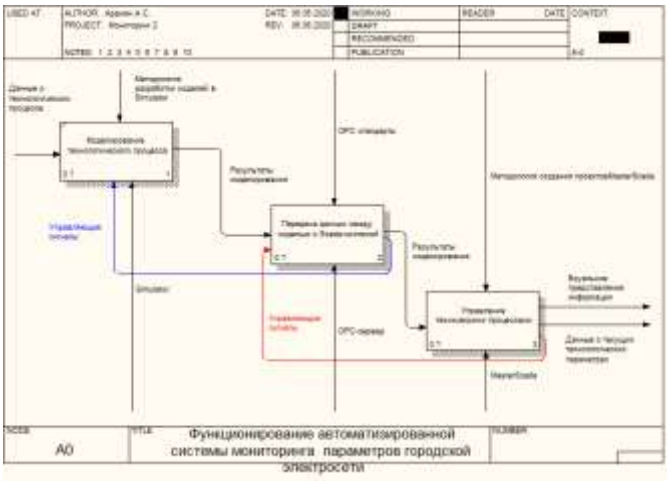


Рис. 2. Подробная диаграмма блока «Функционирование автоматизированной системы мониторинга параметров городской электросети»

В процессе декомпозиции функционального блока получается результирующая диаграмма второго уровня, содержащая функциональные блоки, которые описывают основные подфункции блока, и в этом отношении она называется дочерней диаграммой.

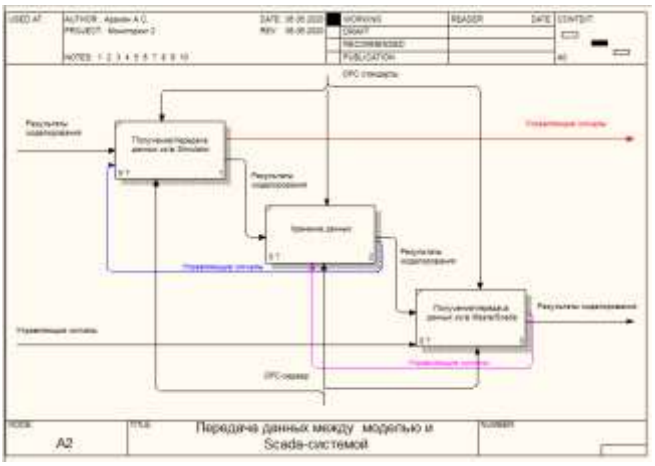


Рис. 3. Подробная диаграмма

Блок «Передача данных между моделью и SCADA-системой» состоит трёх подблоков: «Получение/передача данных из/в Simulator», «Хранение данных» и «Получение/передача данных из/в MasterScada».

B. Создание мнемосхем

Одна из основных задач - организация передачи данных от модели, имитирующей технологический процесс, в SCADA-систему.

Для этого создадим в MasterScada проект, в котором параметры электрической сети (напряжение; ток; активная, реактивная и полная мощность) будут отображаться на мнемонической диаграмме. [5]

После создания и загрузки программы появится окно «Сообщения», в котором отображается различная информация (информация о подключении оператора к системе, пограничный контроль и другие сообщения). [6]

После загрузки сервера OPC начнется графическое представление.

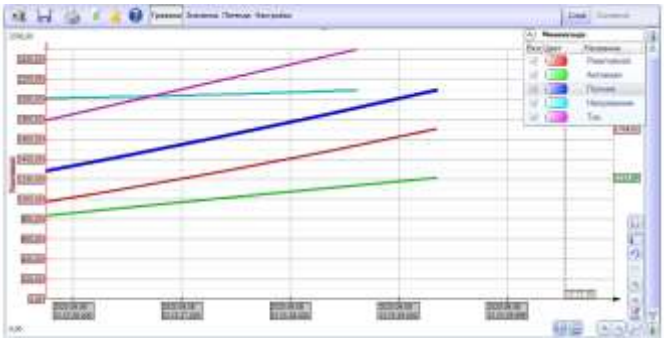


Рис. 4. Построение графиков системы

А на приборах отображаться параметры системы.

Рис. 5. Отображение информации о параметрах системы

IV. Методы линейного программирования

Задачи линейного программирования – это особый класс задач, цель которых – найти такой план транспортировки продуктов со складов до пункта назначения, что требует минимальных затрат.

A. Транспортировка электроэнергии с минимальными потерями

Решение транспортной проблемы начинается с поиска справочного плана. В этой задаче необходимо найти решение, при котором потери электроэнергии при передаче потребителям будут минимальными.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	4 склада; 5 потребителей							
2			Потребители					Запасы
3		Поставщик	B1	B2	B3	B4	B5	ai
4		A1	90	65	55	70	55	350
5		A2	55	55	75	75	80	400
6		A3	75	70	85	80	60	300
7		A4	60	85	50	100	80	350
8								
9	Заявки	bj	260	240	300	360	240	

Рис. 6. Матрица перевозок

Мы ставим ограничения, что объем транспортируемой электроэнергии не может быть отрицательным и все товары должны быть доставлены по месту назначения.

Далее мы введем формулы для расчета общего объема производства.

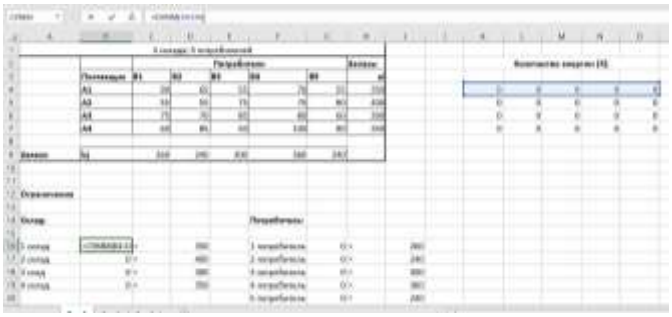


Рис. 7. Ограничение по производству

Также, введём второе ограничение по расчёту общего количества потребляемой энергии.

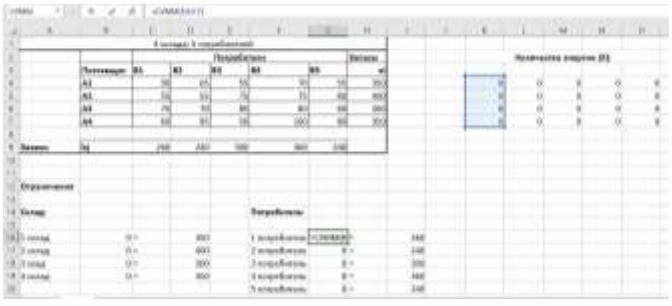


Рис. 8. Ограничение по потреблению

Вызываем команду «Поиск решения» на закладке «Данные» и вводим вручную все ограничения.

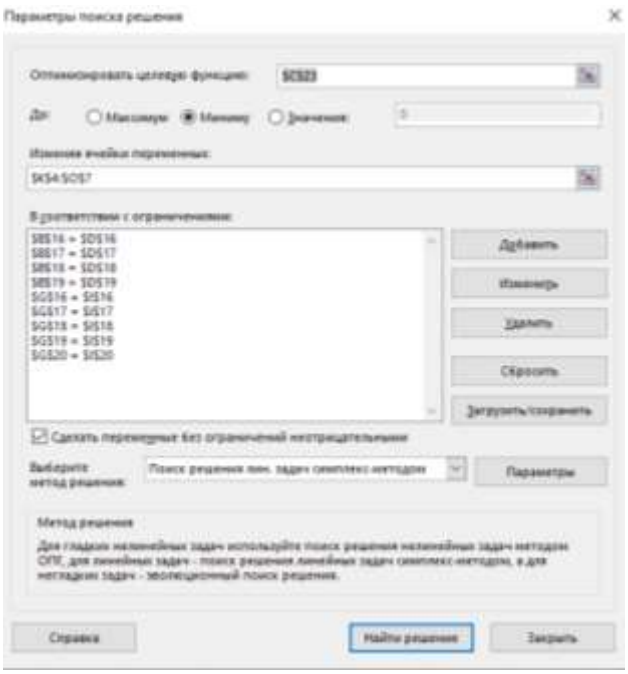


Рис. 9. Параметры поиска решения задачи

Далее программа выбирает наиболее подходящие значения при заданных условиях.

Ограничения					
Склад:			Потребитель:		
1 склад	350 =	350	1 потребитель	260 =	260
2 склад	400 =	400	2 потребитель	240 =	240
3 склад	300 =	300	3 потребитель	300 =	300
4 склад	350 =	350	4 потребитель	360 =	360
			5 потребитель	240 =	240
Целевая функция	83200				

Рис. 10. Подобранные данных при ТЗ

Таким образом, при подборе наилучших значений, удалось избежать больших потерь при транспортировке электроэнергии до потребителя.

V. Заключение

В данной статье при помощи теоретического обзора было подтверждена важность электроэнергии в промышленной и бытовой сфере, произведён анализ объекта исследования, описаны методы анализа и мониторинга важнейших параметров сети для бесперебойной работы, а также решена задача транспортировки.

Список литературы

[1] Анищенко В.А., Колосова И.В. Основы надежности систем электроснабжения: пособие для студентов специальности «Электроснабжение». Мн.: БНТУ, 2008. 151 с.

[2] Современные проблемы энергетики: сборник трудов. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009. 379 с.

[3] Афанасьева О.В., Бандурова А.В. Принятие решений по внедрению нового программного обеспечения на предприятии ООО "Высота" с использованием методов системного анализа. // СИСТЕМНЫЙ

АНАЛИЗ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ. Сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции. 2018. Ч 2. С. 266-277.

[4] Афанасьева О.В., Чунц М.Е. Моделирование производственной деятельности промышленного предприятия с учетом неопределенности. // СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ. Сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции. 2018. Ч. 2. С. 46-50.

[5] Афанасьева О.В. Методы и средства мониторинга вибрационного состояния судовых дизелей // Современные проблемы цифровизации предприятий водного транспорта и подготовки специалистов в области информационных технологий. Сборник трудов Международной научно-практической конференции к 80-летию со дня рождения профессора А.С. Бутова. 2019. С. 43-49.

[6] Ильюшина А.Н., Афанасьев П.М., Новожилов И.М., Вознесенский А.С. Прогнозирование востребованности специальности на рынке минерально-сырьевого комплекса. // Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона. 2019. Т. 1. С. 118-121.

Анализ фреймворков для нейронных сетей

П. П. Бовшик
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
pbovshik@mail.ru

***Аннотация*. В статье приводится анализ фреймворков для создания нейронных сетей. В этой статье описаны три основных фреймворка, используемые для создания систем искусственного интеллекта на основе глубокого обучения: TensorFlow, PyTorch и Keras. В качестве результата проведенной работы представлена таблица, содержащая их сравнительный анализ.**

Ключевые слова: искусственный интеллект; машинное обучение; нейронные сети; фреймворк

I. Введение

Нейронные сети – одна из популярнейших моделей машинного обучения. Направление в разработке систем искусственного интеллекта, заключающейся в воспроизведении работы человеческого мозга с помощью математических моделей. Благодаря нейросетям произошла настоящая революция в области обработки больших данных, повлекшая за собой появление такого инновационного направления, как глубинное обучение.

Нейронные сети получили свое название благодаря принципам работы математической модели, которая схожа с функционированием нервной системы человека. Каждый нейрон представляет собой ячейку, которая получает на вход определенное количество первоначальных данных и отдает на выход уже обработанные данные, а соединены эти ячейки так называемыми синопсисами. За формирование входящих сигналов в выходящий отвечает определенный алгоритм вычисления. Структура простейшей нейронной сети представлена на рис. 1.

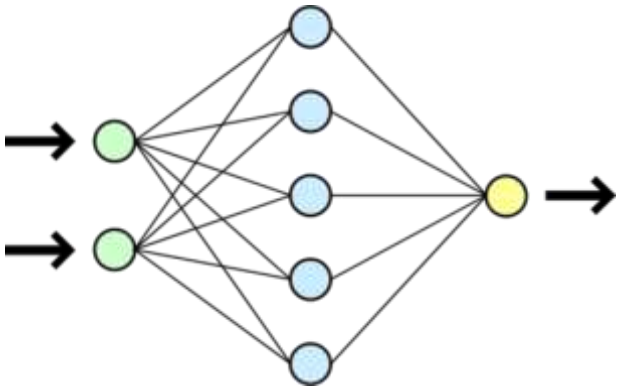


Рис. 1. Простейшая нейронная сеть

Нейронные сети имеют широкую область применения, в основном они используются в прогнозировании, принятии решений, распознавании образов, оптимизации и анализе данных.

II. Фреймворки

Фреймворк – это программная среда специального назначения, своеобразный каркас или основа, которая позволяет добавлять компоненты в зависимости от потребностей и на которой можно сформировать программу любого назначения достаточно быстро и без особых затруднений.

Фреймворк можно сравнить с каркасом деревянного дома, а стены, пол, крыша и убранство этого дома – сама программа, которая создается на основе фреймворка.

A. TensorFlow

Как и большинство фреймворков глубокого обучения, TensorFlow имеет API на Python поверх механизма C и C++, что ускоряет его работу. Сообщество open source разработало также решения для JavaScript, Java, Go C# и Julia. Следствием популярности фреймворка стала подробная документация, включающая не только версию на официальном сайте, но и сторонние источники. В документации можно найти информацию о структуре фрйемворка и инструментах для отслеживания процесса обучения модели. Примером такого инструмента может послужить визуализация с TensorBoard.

Тем не менее, TensorFlow – это низкоуровневый инструмент. Данный протокол заставляет относиться более внимательно к построению архитектуры нейронной сети, верно рассчитывать размерность и объемы входных и выходных данных. Исходя из этого, можно сделать вывод, что при работе с TensorFlow придется писать достаточно много программного кода.

TensorFlow может похвастаться большим количеством инструментов, библиотек и ресурсов сообщества. Такое разнообразие инструментов и ресурсов дает возможность исследователям использовать самые современные технологии машинного обучения, а разработчикам позволяет реализовывать приложения на базе МО.

Платформа предоставляет интуитивно понятные высокоуровневые API-интерфейсы, например Keras, с быстрым выполнением, что обеспечивает немедленную итерацию модели и простую отладку. За счёт мультиплатформенности решение позволяет обучать и разворачивать модели в облаке и локально, независимо от используемого пользователем языка.

TensorFlow работает с статическим вычислительным графом. Это значит, что сначала необходимо определить граф, далее запустить вычисления, а в случае ошибки или неточности внести изменения в архитектуру и заново обучать модель. Данный метод позволяет увеличить эффективность, но многие современные инструменты для построения нейронных сетей позволяют производить какие-либо изменения в архитектуре сети в процессе обучения, практически не влияя на скорость обучения, например, фреймворк глубокого обучения PyTorch.

Одной из проблем TensorFlow также можно считать декларативное программирование, ведь из-за этого ошибка, которая могла быть допущена при написании кода, может скрываться не в том, что вы написали, а внутри сессии, которую запустил код, который вы написали.

Другой недостаток заключается в использовании фреймворком всей видеопамяти. Для его ограничения в использовании данного ресурса необходимо создать специальный файл конфигурации и указать количество памяти, доступное TensorFlow.

Резюмируя, плюсы данного протокола:

- Один из лучших для создания нейросетей.
- Высокоуровневые API-интерфейсы.
- Большое количество поддерживаемых инструментов и библиотек.
- Развитое сообщество.

Минусы:

- Достаточно сложен.
- Использует весь доступный объем видеопамяти.
- Декларативное программирование.
- Свои стандарты.

B. PyTorch

PyTorch – это фреймворк машинного обучения с открытым исходным кодом, написанный на языке Python. Его основной задачей является обеспечение тензорных вычислений с GPU-ускорением. Основной отличительной чертой фреймворка является то, что он дает возможность быстрого и легкого прототипирования в исследованиях, также хорошо подходит для любителей и небольших проектов.

За счёт глубокой интеграции фреймворка с кодом C++ разработчики могут программировать на C и C++ с помощью API-расширения на основе FFI для Python. PyTorch позволяет использовать распространенные дебагеры, например pdb или PyCharm. PyTorch делает процесс тренировки нейронных сетей максимально простым и ясен даже новичку. Несомненными достоинствами данного фреймворка является поддержка модели параллелизма данных, распределенное обучение и наличие большого количества уже обученных моделей.

PyTorch имеет некоторые кардинальные отличия от TensorFlow, например, он оперирует динамически обновляемыми графами, которые дают возможность обрабатывать ввод и вывод переменной длины, что полезно, например, при работе с рекуррентными нейронными сетями, то есть позволяет вносить изменения в архитектуру в процессе работы. Также, если продолжать сравнивать TensorFlow и PyTorch, то стоит отметить два разительных отличия, во-первых, когда при работе с PyTorch вылетает ошибка, то это конкретная недоработка в коде и система указывает строчку с ошибкой, во-вторых, при использовании PyTorch GPU, он самостоятельно займёт только необходимую видеопамять.

Но, к сожалению, рассматриваемый фреймворк не лишен недостатков, например, он поддерживает меньше различных платформ. Еще одним минусом является отсутствие предусмотренных производителем инструментов для визуализации данных, но эта проблема решается установкой сторонних аналогов, например tensorboardX.

Резюмируя, плюсы данного протокола:

- Динамические графы.
- Большое количество специальных модулей, есть возможность их комбинирования.
- Написание собственных типов слоев не составляет особых трудностей.
- Занимает только необходимую видеопамять.
- Императивное программирование.
- Возможность использования большого количества уже обученных моделей.

Минусы:

- Меньше поддерживаемых платформ, чем у TensorFlow.
- Отсутствие встроенных инструментов визуализации данных.
- Плохая документация.

C. Keras

Keras – открытая среда глубокого обучения, написанная на Python. Инженер компании Google Франсуа Шолле представил ее миру в марте 2015 года.

Данный программный продукт разрабатывался для оперативной работы с нейросетями. Основными его преимуществами можно считать компактность, модульность и расширяемость. Keras предназначен в большей мере для небольших проектов, так как с точки зрения производительности нейронных сетей просто не рассчитан под масштабные и сложные задачи, в отличие от того же TensorFlow.

Keras предоставляет интуитивно понятный API для TensorFlow, CNTK и Theano, который, по мнению

большинства инженеров, пока что является лучшим в своём роде.

Фреймворк рассчитан на использование таких широко применяемых строительных блоков нейронных сетей, как слои, целевые и передаточные функции, оптимизаторы, не стоит забывать еще о большом количестве инструментов, которые дают возможность более упрощенной работы с изображениями и текстом.

Фреймворк глубокого обучения Deeplearning4j использует Keras в качестве своего Python API и позволяет импортировать модели из Keras. Также Keras может импортировать модели из Theano и TensorFlow.

Ко всему выше перечисленному можно добавить, что Keras существенно упрощает процесс прототипирования. Создание массивных моделей глубокого обучения в Keras сведены до однострочковых функций. Но это является как плюсом, так и минусом, ведь тогда Keras становится менее конфигурируемой средой, чем низкоуровневые фреймворки.

Таким образом, Keras – лучший фреймворк глубокого обучения для начинающих. Он идеально подходит для обучения и прототипирования простых концептов, чтобы понять суть различных моделей и процессов их обучения.

Резюмируя, плюсы данного протокола:

- Достаточно легок в освоении.
- Подробная документация.
- Высокоуровневый API для TensorFlow.
- Содержит слои, целевые и передаточные функции, оптимизаторы и множество инструментов для упрощения работы с изображениями и текстом.
- Легкое прототипирование.

Минусы:

- Менее конфигурируемая среда, чем низкоуровневые фреймворки.
- Не подходит для больших проектов.

D. Сравнительный анализ

В качестве результата проведенной работы служит таблица, приведенная ниже, которая содержит сравнительный анализ вышерассмотренных фреймворков. Для данного сравнительного анализа были выбраны параметры, которые, по мнению автора, лучше всего отражают особенности и специфику работы с фреймворками для создания нейронных сетей, а именно: какая лицензия необходима фреймворку; открытость исходного кода; платформы, поддерживающие фреймворк; язык написания и интерфейса; поддержка параллельных вычислений; автоматическая дифференциация; наличие предобученых моделей; поддержка рекуррентных и сверточных нейронных сетей; возможность использования ограниченной машины Больцмана и глубокой сети доверия.

ТАБЛИЦА I СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФРЕЙМВОРКОВ

Параметры	**Фреймворк**		
	TensorFlow	***PyTorch***	***Keras***
Лицензия на ПО	Apache 2.0	BSD	MIT
Открытый исходный код	Да	Да	Да
Платформа	Linux, Mac OS, Windows, Android	Linux, Mac OS, Windows	Linux, Mac OS, Windows,
Язык написания	C++, Python, CUDA	C, C++, Python, CUDA	Python
Интерфейс	Python (Keras), C/C++, Java,Go, JavaScript, R, Julia, Swift	Python, C++, Julia	Python, R
Поддержка OpenMP	Нет	Да	Только при Theana на бэкэнде
Поддержка OpenCL	С помощью SYCL	Через отдельно обслуживаемый пакет	Может использовать Theano и TF как бэкэнд
Поддержка CUDA	Да	Да	Да
Автоматическая дифференциация	Да	Да	Да
Наличие предварительно обученных моделей	Да	Да	Да
Рекуррентные нейронные сети	Да	Да	Да
Сверточная нейронная сеть	Да	Да	Да
RBM/DBN	Да		Нет
Параллельные вычисления	Да	Да	Да

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сказать, что если у разработчика мало опыта работы с нейросетями и необходимо с нуля разобраться в этом, то лучший выбор – Keras. Данный фреймворк имеет возможности быстрого прототипирования, хорош в вопросах перевода, распознавания изображений и речи. В исследовательских целях обычно используется PyTorch. Он предназначен для небольших проектов, хорошо подходит для быстрого и эффективного обучения моделей. TensorFlow предназначен уже для более масштабных проектов, например, создания многослойных нейронных сетей, также используется для распознавания речи, лиц, объектов, изображений и работы с текстом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ильин И.В., Гудков К.В. Анализ программных средств для глубинного обучения искусственных нейронных сетей. Пенза: Изд-во ПГТУ, 2018.

[2] Stevens E., Antiga L., Viehmann T. Deep Learning with PyTorch. Shelter Island: Manning Publications Co., 2020.

Система управления рулевым приводом мобильного робота

С. М. Богданова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
*s*mbogdanova@stud.etu.ru

***Аннотация*. Проведено исследование характеристик объекта управления, составлена и верифицирована его математическая модель. Построен алгоритм управления контуром скорости и контуром положения рулевого электропривода с настройкой ПИ-регуляторов и адаптивного управления.**

Ключевые слова: рулевой привод, мобильный робот, двигатель постоянного тока, микроконтроллер, система управления, адаптивное управление

I. Введение

В настоящее время полевые и сервисные роботы сталкиваются со специфическими и значительными проблемами. Первая проблема заключается в том, что робот должен работать и двигаться в сложной, загроможденной и изменяющейся среде. К примеру, робот доставки медикаментов и инвентаря в больнице должен работать, несмотря на толпы людей и изменяющуюся во времени конфигурацию припаркованных каталок и тележек. Роботизированные или самоуправляемые автомобили должны перемещаться по дорогам, избегать препятствий и подчиняться светофорам и правилам дорожного движения. Тенденция развития современных управляемых механических систем связана с тем, что требования к качеству управления такими системами все время повышаются. Система автоматического управления механическим объектом должна отвечать этим требованиям.

Общая цель настоящей работы связана с исследованием возможности построения таких законов управления, которые могли бы стабилизировать движения механической системы в достаточно широких, естественных условиях. Закон управления должен:

- обеспечивать поддержание скорости вращения рулевого электропривода на заданном уровне в условиях резко изменяющейся нагрузки;
- обеспечивать качественный переходный процесс изменения угла поворота колес с перерегулированием не более 5 %.

II. Математическое описание объекта управления

Для корректного построения системы управления рулевым электроприводом наземного колесного робота, необходимо провести идентификацию параметров и верификацию модели объекта управления, в качестве которого у нас будет выступать двигатель постоянного тока с постоянными магнитами, приводящий в движение рулевой электропривод.

Математическое описание двигателя постоянного тока независимого возбуждения с постоянными магнитами на статоре можно представить в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\omega(t)}{\mathrm{d}t} = \dfrac{c_m}{J} i(t) - \dfrac{1}{J}\left(M_{\text{н}}(t) + k_{\text{вт}}\omega(t) + M_{\text{ст}}\left(\omega, M_{\text{д}}\right)\right) \\ \dfrac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_{\text{я}}}{L} i(t) - \dfrac{c_e}{L}\omega + \dfrac{1}{L}u(t) \\ \dfrac{\mathrm{d}\varphi(t)}{\mathrm{d}t} = \omega \end{cases}, \quad (1)$$

где ω − скорость вращения якоря, c_m − коэффициент пропорциональности, называемый постоянной момента двигателя, i − ток в цепи якоря, J − суммарный момент инерции, $M_{\text{ст}}$ − момент сухого трения, $k_{\text{вт}}$ – коэффициент вязкого трения, $R_{\text{я}}$ − активное сопротивление якорной обмотки, L – индуктивность якорной обмотки, а момент сухого трения учитывается как:

$$M_{\text{ст}} = \begin{cases} M_{\text{ст}} sign(\omega), \text{при } \left|M_{\text{д}}\right| \geq \left|M_{\text{вт}} + M_{\text{ст}}\right| \\ M_{\text{д}} - M_{\text{ст}}, \text{при } \left|M_{\text{д}}\right| < \left|M_{\text{вт}} + M_{\text{ст}}\right| \end{cases}. \quad (2)$$

На основе системы уравнений (1) с учетом выражения (2) составим структурную схему двигателя постоянного тока в среде *Matlab/Simulink*, представленную на рис. 1.

III. Идентификация параметров и верификация модели объекта управления

Для проведения компьютерного моделирования необходимо определить параметры рассматриваемого ДПТ.

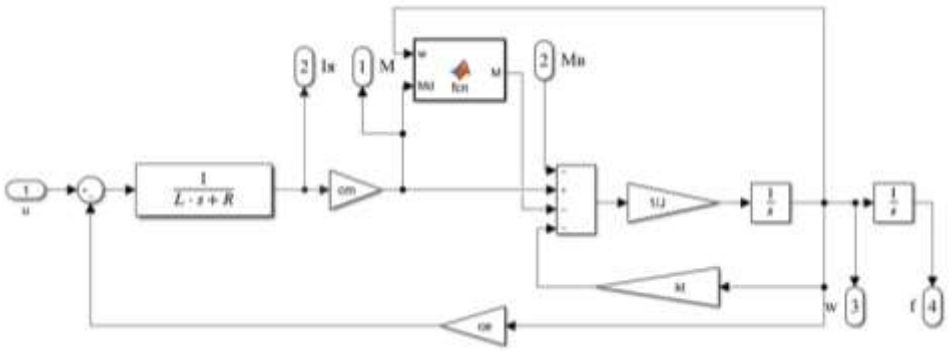


Рис. 1. Структурная схема ДПТ в среде *Matlab/Simulink*

В таблицу сведены характеристики мотор-редуктора, полученные экспериментальным путем.

ТАБЛИЦА. ПОЛУЧЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТОР-РЕДУКТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Параметры ДПТ	**Результаты измерений**
Rя, Ом	0,479
L, мкГн	179
$c_е, \frac{В}{рад/с}$	1,87
$c_м, \frac{Н*м}{А}$	1,87
$M_{ст}$, Н*м	0,335234
$k_{вт}$	0,0923
J, кг $*$ м^2	0,02

Чтобы удостовериться о корректности построенной модели, сравним графики переходных процессов по скорости вращения электродвигателя, полученные экспериментальным путем и путем моделирования, представленные на рис. 2.

Совпадение графиков переходных процессов по скорости свидетельствует о том, что моделирование электродвигателя постоянного тока с постоянными магнитами было проведено корректно и, в дальнейшем, данную модель можно использовать для моделирования объекта управления при создании системы управления рулевым электроприводом.

IV. СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Разрабатываемая системы управления будет иметь архитектуру, состоящую из следующих уровней:

- Верхний уровень – персональный компьютер, с помощью которого пользователь может отслеживать состояние работы системы и задавать желаемое положение руля.
- Средний уровень – микроконтроллер dsPIC33 компании Microchip Technology, осуществляющий подачу необходимых сигналов управления и обработку поступающей информации с системы.
- Нижний уровень – используется датчик угла поворота (энкодер) как обратная связь управления, а также задействован усилитель мощности в виде Н-моста, для управления двигателем.

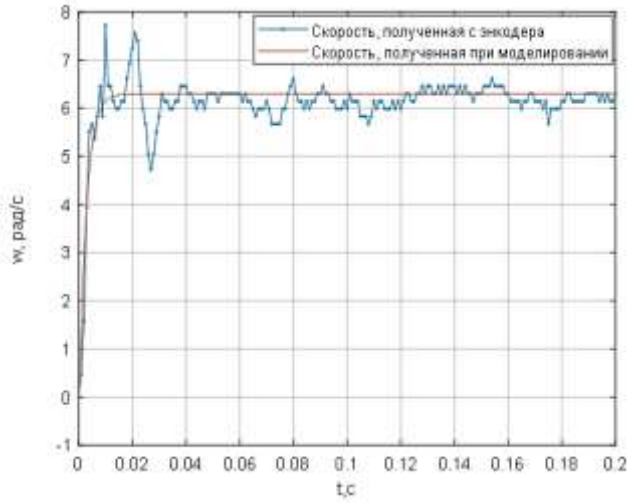


Рис. 2. Графики переходных процессов по скорости

Разрабатываемая система управления должна обеспечивать поддержание скорости вращения электродвигателя рулевого привода на заданном уровне в условиях 4-х кратного изменения момента инерции, а также обеспечивать регулирование по положению, не допуская перерегулирования угла поворота руля более чем на 5 % от заданного. Для реализации данной системы необходимо разработать алгоритм управления, последовательность действий которого будет приводить к поставленной цели.

Для оценки эффективности ПИД-регулятора проведем испытания для различных значений момента инерции. Графики переходных процессов для различного значения момента инерции для скорости и положения представлены на рис. 3 и 4.

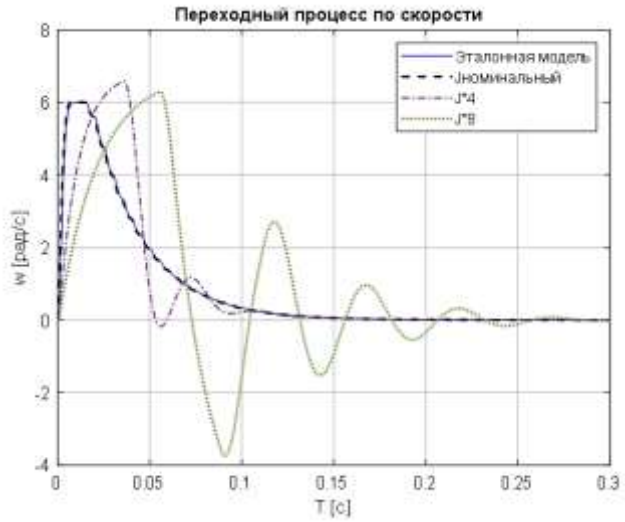


Рис. 3. Графики переходных процессов по скорости

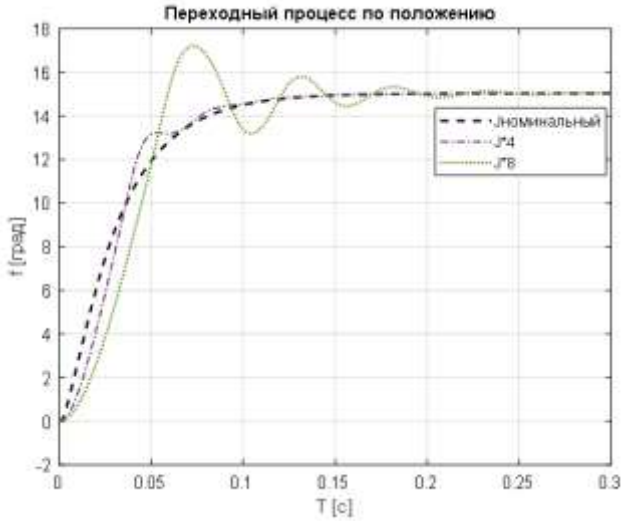


Рис. 4. Графики переходных процессов по положению

Данные графики показывают, что уже при четырехкратном увеличении момента инерции в переходном процессе наблюдается перерегулирование, а при дальнейшем изменении момента инерции появляются колебания.

Введем дополнительный внешний момент и проанализируем качество работы ПИД-регулятора, построив переходные процессы по скорости и положению двигателя, представленные на рис. 5 и 6.

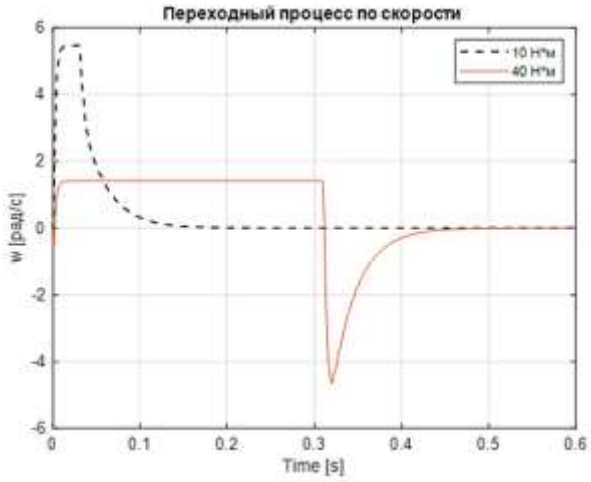


Рис. 5. Графики переходных процессов по скорости при введении постоянного внешнего момента

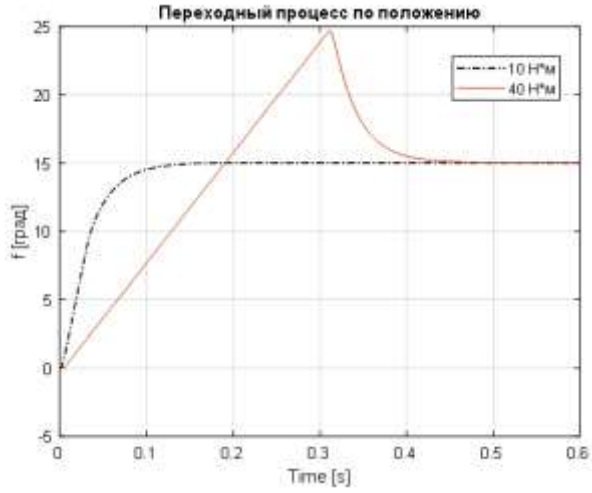


Рис. 6. Графики переходных процессов по положению при введении постоянного внешнего момента

Таким образом, из полученных графиков видно, что ПИ-регулятор обеспечивает надлежащее качество переходного процесса только в узком диапазоне изменения внешнего момента.

Поскольку эффективность ПИД-регулятора ограничена узким диапазоном характеристик системы, в качестве дополнительного регулирования скорости вращения двигателя введем сигнальную адаптацию с использованием эталонной модели. Данный вид адаптации обладает рядом качеств, чрезвычайно привлекательных с точки зрения практического применения: простотой реализации, безынерционностью адаптивного механизма, эффективностью подавления внешних возмущений и нелинейных свойств объекта управления.

Закон управления выглядит следующим образом:

$$U_{ад} = \begin{cases} h, & \text{при } f(t) > h \\ f_{ад}(t) \text{ при } -h \le f(t) \le h, \\ -h \text{ при } f(t) < -h \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{ад}(t) = k((\omega_{дв} - \omega_{н}) + y_1(\dot{\omega}_{дв} - \dot{\omega}_{н})), \quad (4)$$

Оценим работу системы с введенным адаптивным управлением. На рис. 7, 8 представлены графики переходных процессов при изменении момента инерции.

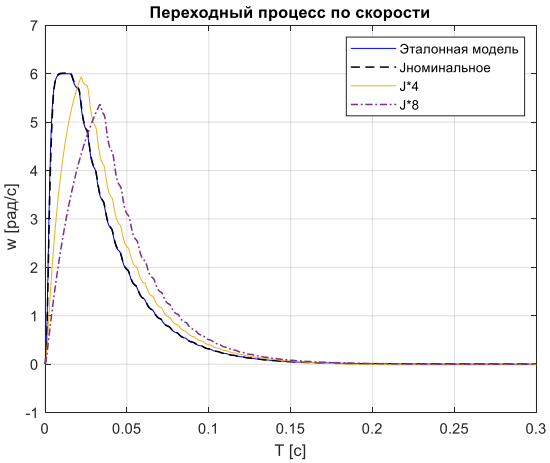


Рис. 7. Графики переходных процессов по скорости при изменении момента инерции

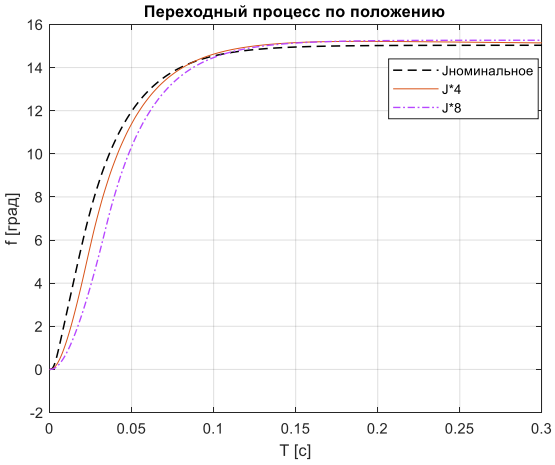


Рис. 8. Графики переходных процессов по положению при изменении момента инерции

Из данных графиков можно заметить, что при восьмикратном увеличении момента инерции в переходном процессе по положению возникает перерегулирование, но его величина составляет не более 3%, что является допустимым согласно заданным требованиям.

На рис. 9 представлены графики переходных процессов по положению при введении внешнего момента.

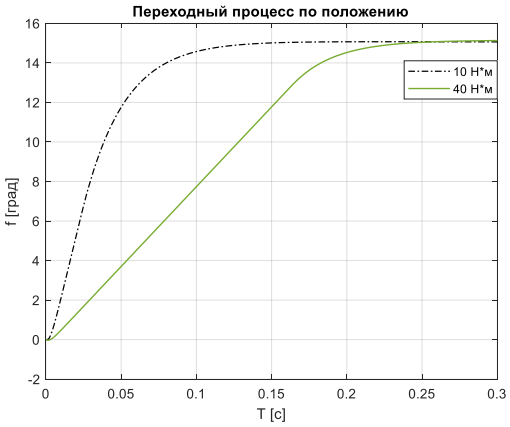


Рис. 9. Графики переходных процессов по положению при введении внешнего момента

Из получившихся графиков можем наблюдать, что адаптивное управление справилось с приложенным воздействием внешнего момента, тогда как только при ПИ-регулировании на графике переходного процесса по положению наблюдается значительное перерегулирование.

V. Заключение

По результатам моделирования была проведена оценка полученных результатов работы системы и можно выделить следующее:

- введение адаптивного управления в контур скорости оправдало себя при уже четырехкратном изменении момента инерции;
- система управления справляется с воздействием приложенного внешнего момента величиной до 50 % от собственного момента электропривода, не допуская перерегулирования по положению больше 5 %.

Таким образом, при многократном увеличении момента инерции и воздействии внешнего момента на систему, целесообразно использование адаптивного управления.

Список литературы

[1] Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. “Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением”. Л.: Энергоатомиздат, 1984.

[2] Гаджиев Г.М., Жиленков А.А. “Уточнённое моделирование двигателя постоянного тока с постоянными магнитами в среде Matlab/Simulink” // Журнал Actualscience, 2015, Том 1, N 4 (4).

[3] Путов В.В. “Адаптивное и модальное управление механическими объектами с упругими деформациями”: Учеб. пособие. СПб.:Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002.

[4] Бовичева Е.В., Второв В.Б. “Об одном подходе к расчету параметров адаптивной системы с эталонной моделью” // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Автоматизация и управление. 2006. Вып. 1 С. 58-63.

Исследование модели многосвязного упругого объекта методами бифуркационного анализа

Н. В. Болотин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
bolotin.n95@gmail.com

***Аннотация*. В настоящее время происходит активное развитие отрасли, связанной с развитием мобильной робототехники. Это привело к развитию новых математических методов, помогающих анализировать и исследовать такие объекты на предмет устойчивости движения. Например, известными методами являются: метод Ляпунова, критерии Гурвица, Михайлова, Найквиста и другие. Но из-за сложности самого объекта исследованиям нужны новые методики, которые могли бы позволить провести анализ без необходимости линеаризации и потери точности. Одним из таких методов является бифуркационный анализ, рассмотренный в настоящем докладе, который предоставляет методики работы с непрерывными динамическими системами, имеющими описание в виде дифференциальных уравнений с ключевыми параметрами. Основное внимание уделено объекту исследования – строенному маятнику с упругой связью.**

Ключевые слова: бифуркационный анализ, устойчивость, строенный маятник

I. Математическое описание объекта управления.

В общем случае исследуемая система состоит из n перевернутых маятников с длиной стержней *l*, на конце которых располагается масса *m*. Стержни жестко закреплены на подвижной тележке. Маятники скреплены между собой пружинами с жесткостью *k*. При вертикальном расположении системы пружины находятся в нерастянутом состоянии. На рис. 1 представлена система в общей форме со множеством маятников.

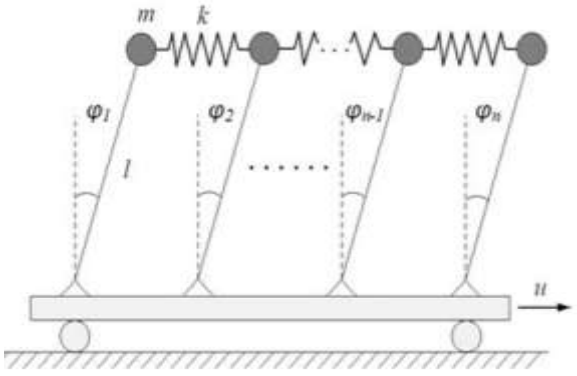


Рис. 1. Система связанных обратных маятников

Запишем уравнения моментов исследуемой системы [1].

$$\begin{aligned} I_l \frac{d\vec{\omega}_l}{dt} &= \overrightarrow{M^{(g)}}_l + \overrightarrow{M^{(kr)}}_l + \overrightarrow{M^{(u)}} \\ I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} &= \overrightarrow{M^{(g)}}_i + \overrightarrow{M^{(kr)}}_i + \overrightarrow{M^{(kl)}}_i + \overrightarrow{M^{(u)}} \\ I_n \frac{d\vec{\omega}_2}{dt} &= \overrightarrow{M^{(g)}}_n + \overrightarrow{M^{(kl)}}_n + \overrightarrow{M^{(u)}} \\ i &= \overline{2, n-1} \end{aligned} \quad (1)$$

где I_l – момент инерции отдельного маятника, $\vec{\omega}_l$ – угловая скорость, $\overrightarrow{M^{(g)}}_i$ – возвращающий момент силы тяжести, $\overrightarrow{M^{(kr)}}_i$ и $\overrightarrow{M^{(kl)}}_i$ – моменты силы упругости пружин, соответственно расположенных с левой и с правой стороны от отдельно выбранного маятника, а $M^{(u)}$ – момент управления. В системе рассматривается плоское движение, потому все указанные векторные силы расположены перпендикулярно плоскости рисунка. Такое представление дает возможность перейти к уравнениям в скалярной форме.

Как видно на рис. 2, положение маятников характеризуется углами их отклонения от вертикальной оси φ. При этом, углы отклонения маятников предполагаются малыми. В этом случае удлинение пружины Δx можно приближенно записать следующим образом [2]:

$$\triangle x_i \approx l(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \quad (2)$$

Введем собственную частоту колебаний для изолированного маятника [3].

$$\omega = \sqrt{\frac{mgl}{I}} \quad (3)$$

Также предположим, что массы являются точечными, сосредоточенными на концах соответствующих стержней, тогда [4].

$$I = ml^2 \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (4)$$

Таким образом, учитывая равенства (2) – (4), система уравнений (1) будет иметь вид [5].

$$\begin{aligned}
\ddot{\varphi}_1 &= \omega^2\varphi_1 + a(\varphi_2 - \varphi_1) - c \\
\ddot{\varphi}_i &= \omega^2\varphi_i + a(\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}) - c \\
\ddot{\varphi}_n &= \omega^2\varphi_n + a(\varphi_n - \varphi_{n-1}) - c
\end{aligned} \qquad (5)$$

где $a_i = \frac{k}{m}$, $c = \frac{u}{l}$.

Описание системы (5) носит идеализированный характер, поскольку массы маятников и коэффициенты жесткости пружин приняты равными.

Опишем систему в общем виде, когда массы маятников являются точечными, но разных значений, а коэффициенты жесткости также могут принимать различные между собой значения [6].

$$\begin{aligned}
\ddot{\varphi}_1 &= \omega^2\varphi_1 + k_1\left(\frac{1}{m_2}\varphi_2 - \frac{1}{m_1}\varphi_1\right) - c \\
\ddot{\varphi}_i &= \omega^2\varphi_i + k_i\left(\frac{1}{m_{i+1}}\varphi_{i+1} - \frac{1}{m_i}\varphi_i\right) - k_{i-1}\left(\frac{1}{m_i}\varphi_i - \frac{1}{m_{i-1}}\varphi_{i-1}\right) - c \\
\ddot{\varphi}_n &= \omega^2\varphi_n + k_{n-1}\left(\frac{1}{m_n}\varphi_n - \frac{1}{m_{n-1}}\varphi_{n-1}\right) - c
\end{aligned} \qquad (6)$$

Систему уравнений (6) возможно решить и найти общие решения.

II. Бифуркационный анализ

В данном разделе рассмотрено введение ограничений, решение системы (6) и построение графиков соответствующих решений.

A. *Ограничения системы*

Для исследования был выбран объект – строенный маятник с зависимыми, изменяемыми параметрами $k_1, k_2, m_1, m_2, m_3, c, \omega$. Необходимо ввести ограничения на диапазон изменения значений выбранных параметров.

Коэффициент жесткости будем варьировать до 10 Н/м. Для более точных ограничений и изменения коэффициента жесткости пружины используется формула [7].

$$k = \frac{G d_d^{\,4}}{8 d_f^{\,3} n} \qquad (7)$$

где G – модуль сдвига пружины, который равен 78500 Мпа, d_d – диаметр прутка в мм, d_f – диаметр пружины относительно оси в мм, n – количество витков. Выберем жесткость пружины равное 10 Н/м, количество витков равное 50 с шагом витка 2 мм и диаметром прутка 10 мм. Тогда d_f = 5.81 мм. При увеличении жесткости пружины будет уменьшаться d_f. Для исследуемой системы выбранные параметры подходят. Масса маятника ограничивается значением 1 кг.

B. *Бифуркационный анализ*

В качестве примера рассмотрим исследование динамики системы при вариации бифуркационного параметра *k1*. С помощью программы на языке Matlab произведем символьные вычисления с системой (6), найдем состояния равновесия для всех трех углов и построим соответствующие графики с помощью функций fplot, ezsurf. На рис. 2–5 представлены результаты работы этих функций.

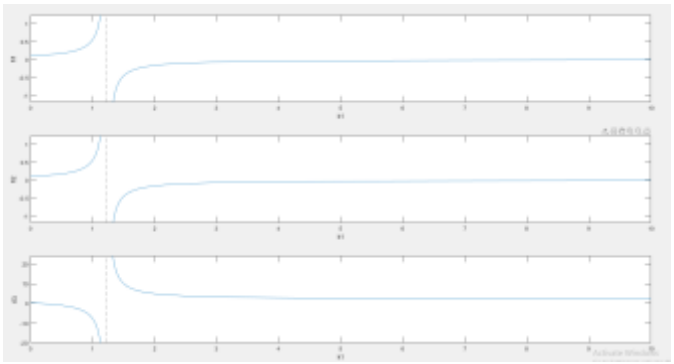


Рис. 2. Графики решения системы (6) при бифуркационном параметре k_1

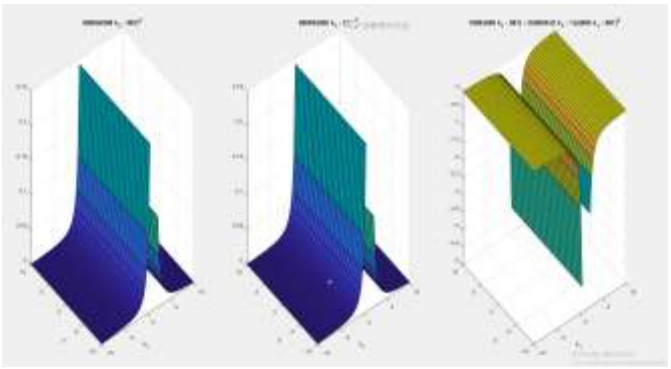


Рис. 3. Графики производной решения по бифуркационному параметру k_1

При рассмотрении рис. 2–3 очевидно, что существуют такие области, в которых решение отсутствует. Следовательно, что нет необходимости моделирования системы с такими значениями.

Рис. 4 демонстрирует отсутствие точки бифуркации при исследовании решении, в котором бифуркационным параметром выбрана переменная *c*. Данное утверждение подтверждается рис. 5, на котором представлены графики производной решения системы (6).

Так же очевидно, что на данных графиках отсутствуют точки бифуркации, из чего следует вывод, что данный параметр не является бифуркационным.

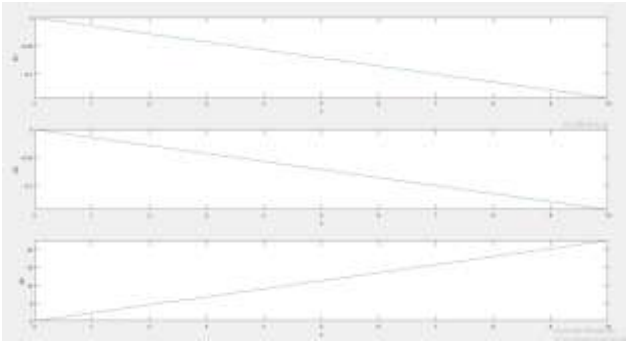


Рис. 4. Графики решения системы (6) при бифуркационном параметре c

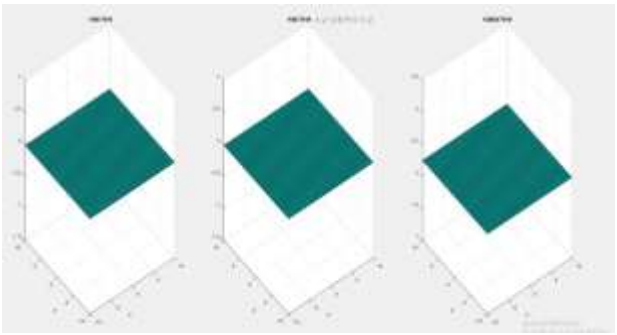


Рис. 5. Графики производной решения по бифуркационному параметру c

При дальнейшем исследовании оставшихся параметров было выяснено, что параметры k_1, m_1, m_2, ω являются бифуркационными с критическими значениями 1.2, 0.3, 0.1, 9 соответственно, m_3, c не являются бифуркационными, а k_2 приводит к изменению динамики системы, а именно исчезновению одного из решений при одновременном варьировании с k_1.

C. Моделирование системы

Моделирование производилось в программе Matlab Simulink, в которой была подготовлена схема строенного маятника, которая изображена на рис. 6.

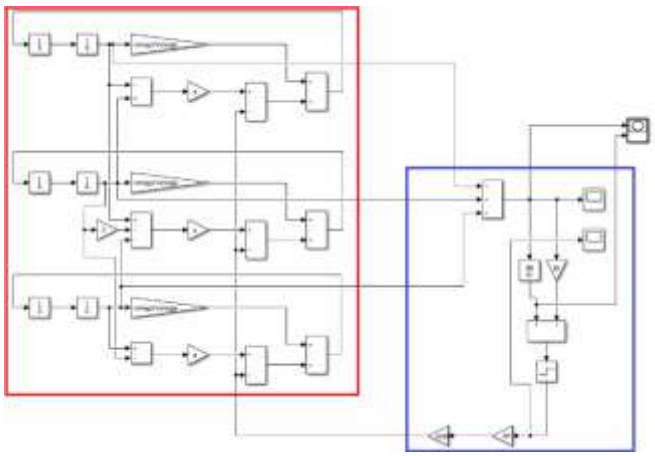


Рис. 6. Схема исследуемой модели строенного маятника в Matlab Simulink

Красным обозначена часть самой системы, которая описана системой (6), синим регулятор, создающий управляющее воздействие в виде импульсов, закон управления которого описан уравнением [8].

$$u = A\,sign(Bs + \dot{s}) \tag{8}$$

Моделирование производилось с двумя наборами параметров для проверки работоспособности регулятора.

Результат первого моделирования представлен на рис. 7. Шаг клетки равен одной секунде.

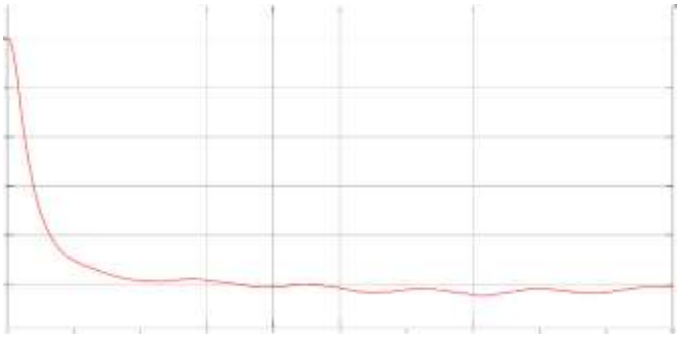


Рис. 7. График зависимости суммарного угла отклонения системы от времени, при которой происходит стабилизация маятников в вертикальном положении

После двух секунд системы стабилизируется и удерживает маятник около вертикального положения равновесия на протяжении всего последующего времени моделирования. Результат второго моделирования представлен на рис. 8.

Рис. 8. График зависимости суммарного угла отклонения системы от времени, при которой не происходит стабилизация маятников в вертикальном положении

III. Заключение

В результате исследования системы строенного маятника методом были получены формулы описания системы, введены ограничения для системы, чтобы уменьшить исследуемый интервал бифуркационных параметров, с использованием пакета математических вычислений создана схема системы с регулятором для проведения моделирования динамики системы с возможностью изменения параметров: массы, жесткости пружин, длины стержней, коэффициента П регулятора. Показано, что не все параметры при изменении значений

вносят изменения в динамику системы. Лишь часть из них приводит к появлению бифуркаций и отсутствию решения. Дальнейшее изучение проблемы сводится к созданию реальной модели объекта управления с возможностью изменения массы объектов на концах стержней, коэффициентов жесткости пружин и длин стержней.

IV. Список литературы

[1] Блехман И.И. Вибрационная механика. Москва: «Наука», 1994, с. 95-106.

[2] Stephenson, A. On an induced stability. Phil. Mag. 1908. 15. P. 233.

[3] Бутиков Е.И. Стабилизация перевернутого маятника. 15 с.

[4] Соловьев А.М., Семенов М.Е., Мелешенко П.А. Стабилизация перевернутых маятников в условиях упругих связей. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2018. 7 с.

Система управления приводом на основе бесколлекторного электродвигателя постоянного тока

А. П. Бондарчук
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
apbondarchuk@yandex.ru

***Аннотация*. В последнее время широкое распространение получили приводные системы на основе бесколлекторных электродвигателей постоянного тока. Применение таких двигателей позволяет увеличить энергоэффективность привода, а также отказаться от системы редукторов и передаточных механизмов. Благодаря своим преимуществам, данные двигатели нашли применение в области мобильной робототехники в качестве ведущих или поворотных приводов, поэтому актуальной задачей является разработка системы управления, которая обеспечивает эффективное регулирование скорости и момента электродвигателя.**

Ключевые слова: бесколлекторный электродвигатель; система управления; моделирование; Matlab

I. Математическая модель бесколлекторного электродвигателя

Математическая модель бесколлекторного электродвигателя постоянного тока (БДПТ) составлена в программе Mathlab Simulink с использованием математического описания БДПТ во вращающейся системе координат (рис. 1).

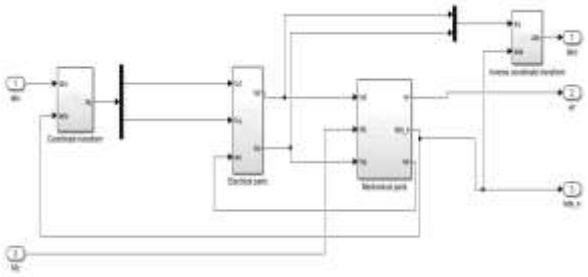


Рис. 1. Математическая модель БДПТ

Модель состоит из электромагнитной части (electrical parts) и механической части (mechanical parts).

A. Электромагнитная часть модели БДПТ

Электромагнитная часть модели (рис. 2) построена по уравнениям статорной цепи двигателя (1) и воспроизводит процессы, протекающие в статорных обмотках БДПТ. [1]

$$\begin{cases} \dfrac{dI_{sd}}{dt} = \dfrac{1}{L_{sd}}(U_{sd} - R_s I_{sd} + \omega L_{sq} I_{sq}) \\ \dfrac{dI_{sq}}{dt} = \dfrac{1}{L_{sq}}(U_{sq} - R_s I_{sq} - \omega L_{sd} I_{sd} - \omega \Psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

где I_{sd}, I_{sq} – токи статора во вращающейся системе координат; U_{sd}, U_{sq} – напряжения статора во вращающейся системе координат; R_s – сопротивления обмоток статора; L_{sd}, L_{sq} – индуктивности обмоток статора по осям d и q; Ψ_f – потокосцепление ротора; ω – угловая скорость вращения поля статора.

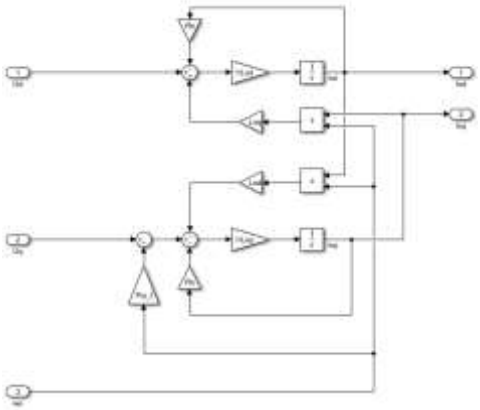


Рис. 2. Электромагнитная часть модели БДПТ

B. Механическая часть модели БДПТ

Механическая часть модели (рис. 3) воспроизводит процессы, связанные с вращением ротора БДПТ. Электромагнитный момент БДПТ вычисляется из вектора статорного тока по (2) [1].

$$M_e = \frac{3Z_p}{2}(I_{sq}\Psi_f + I_{sd}I_{sq}(L_{sd} - L_{sq})) \quad (2)$$

где M_e – электромагнитный момент БДПТ; Z_p – число пар полюсов.

Скорость вращения ротора электродвигателя вычисляется по (3) [2].

$$M_e - M_c - K_{тр}\omega = J\frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

где M_c – момент сопротивления нагрузки; $K_{тр}$ – коэффициент трения механической части БДПТ; J – момент инерции ротора.

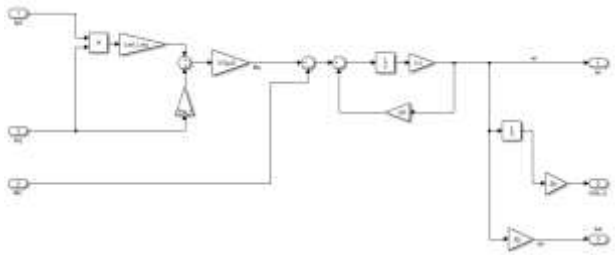


Рис. 3. Механическая часть модели БДПТ

C. Модель автономного инвертора напряжения

Для реализации вектора статорного напряжения используется автономный инвертор напряжения (рис. 4).

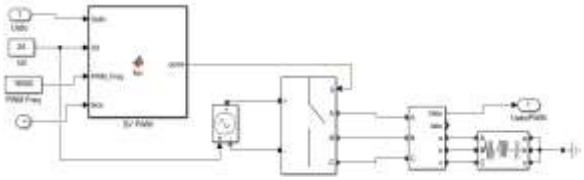


Рис. 4. Модель автономного инвертора напряжения

Задание вектора напряжения производится с помощью генерации сигнала векторной ШИМ. Трехфазная мостовая схема в модели для упрощения расчета представлена идеальными ключами. Параметры двигателей представлены в табл. I и II.

II. Физическая модель бесколлекторного электродвигателя

Для физического моделирования процессов, протекающих в БДПТ был разработан лабораторный стенд (рис. 5).

В качестве испытуемого двигателя используется БДПТ с постоянными магнитами на роторе, а в качестве нагрузочного – электродвигатель постоянного тока. Для управления БДПТ применяется инвертор фирмы STMicroelectronics – B–G431B–ESC1.

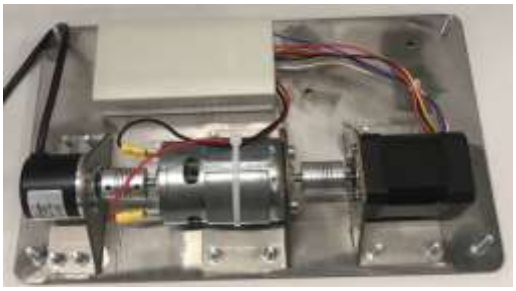


Рис. 5. Лабораторный стенд с БДПТ

ТАБЛИЦА I Параметры исследуемого БДПТ

R_s,Ом	0.44
$L_S=L_{sd}=L_{sq}$, мкГн	559
Z_p	4
Ψ_f, Вб	0.008
J, н*м^2	0.000045
$K_{тр}$, Н*м*с/рад	0.00027

ТАБЛИЦА II Параметры нагрузочного ДПТ

$R_я$,Ом	0.746
Lя мГн	481.7
C_e, В*мин/об	0.002363
$C_м$, Н*м/А	0.02257
J, н*м^2	0.0000109
$K_{тр}$, Н*м*с/рад	0.00043

III. Верификация математической модели

Верификация математической модели производится при подаче постоянного вектора статорного напряжения $U_s=\{U_d;U_q\}=\{0B;6B\}$. Для проверки правильности математической модели сравниваются графики скорости вращения ротора. При сравнении графиков анализируются перерегулирование и время регулирования.

На рис. 6 приведены графики БДПТ на холостом ходу, численные значения показателей качества переходных процессов представлены в табл. III.

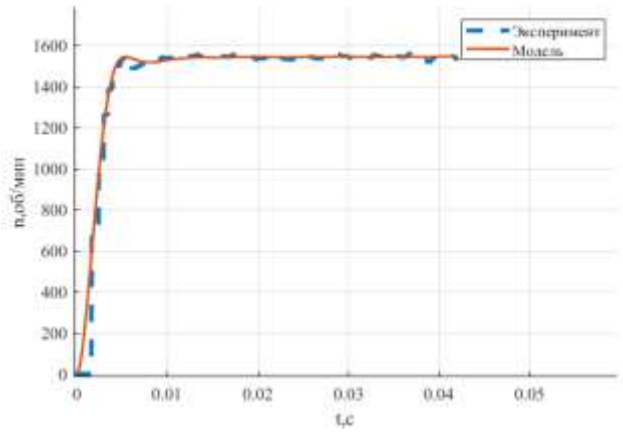


Рис. 6. Графики скорости на холостом ходу

ТАБЛИЦА III Показатели качества переходных процессов на холостом ходу

Показатель качества	**Эксперимент**	**Модель**
t_p, с	0.0043	0.0041
σ,%	0.132	0.129

Так как для построения системы управления требуется исследование БДПТ под нагрузкой, был произведён аналогичный эксперимент с присоединённым нагрузочным ДПТ. Графики переходных процессов приведены на рис. 7, а показатели качества сведены в табл. IV.

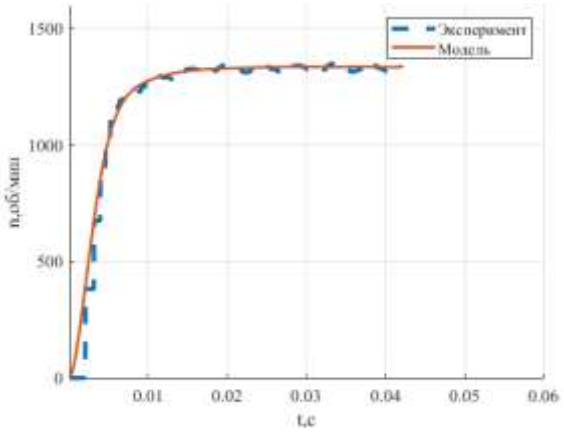


Рис. 7. Графики скорости под нагрузкой

ТАБЛИЦА IV ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

Показатель качества	Эксперимент	Модель
t_p, с	0.00983	0.0095
σ,%	0	0

Как видно из графиков результаты моделирования повторяют экспериментальные данные, что доказывает корректность построенной математической модели и позволяет ее использовать для разработки и исследования системы управления.

IV. ВЕКТОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БДПТ

Для управления скоростью и моментом БДПТ была разработана векторная система управления (рис. 8).

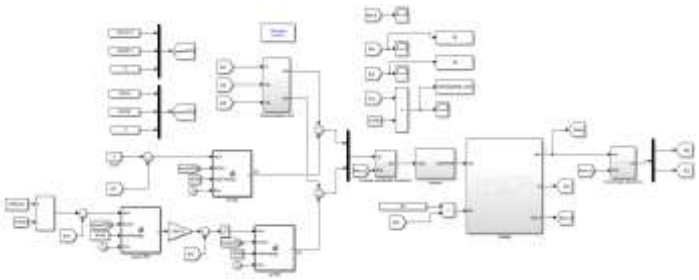


Рис. 8. Векторная система управления

Система управления состоит из трёх контуров:

- Контур тока I_q – управляет q составляющей статорного тока, отвечающий за величину электромагнитного момента двигателя.
- Контур тока I_d – поддерживает постоянной d составляющую статорного тока.
- Контур скорости – выполняет поддержание заданной скорости вращения ротора, является внешним контуром, сигнал управления которого служит задающим воздействием для контура тока I_q.

В качестве задающего воздействия для системы используется сигнал задания скорости вращения ротора в оборотах в минуту.

A. Исследование работы системы управления с ПИД регулятором в контуре скорости

Классическим решением для управления скоростью в векторной системе управления является использование ПИД регулятора. В приведенной системе для управления контурами используются цифровые пропорционально интегрально дифференциальные (ПИД) регуляторы. Частота контуров выбрана 16 кГц, равная частоте ШИМ инвертора напряжения.

Настройка ПИД регуляторов проводилась экспериментальным путем, для получения монотонного процесса. В качестве номинальной точки, для которой производилась настройка регулятора, была выбрана скорость ω_r*=1500 об/мин.* В результате были подобраны следующие коэффициенты регуляторов:

- Контур скорости: K_p=6.25; K_i=0.039;K_d=5.
- Контуры токов: K_p=6.25; K_i=0.156; K_d=5.

В результате моделирования и эксперимента на номинальной скорости с подобранными коэффициентами регуляторов были получены переходные процессы скорости, изображенные на рис. 9.

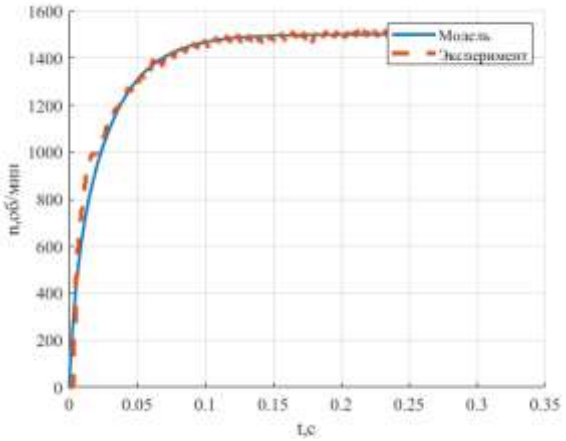


Рис. 9. Переходные процессы для скорости в номинальной точке

Как видно из рис. 9 результаты моделирования системы управления совпадают с экспериментальными данными, оба переходных процесса носят монотонный характер и имеют время регулирования t_p*=0.08 с.*

Для проверки работы регуляторов на скоростях выше и ниже номинальной были проведены эксперименты при ω_r*=2500 об/мин* и ω_r*=1000 об/мин.* Нормированные графики переходных процессов изображены на рис. 10.

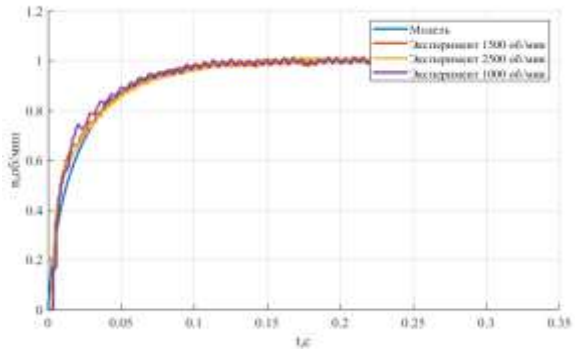


Рис. 10.Переходные процессы для скорости при отклонении от номинальной точки

Как видно из рис. 10 переходный процесс при отклонении от номинальной точки имеет тот же характер, что позволяет сделать вывод, что использование ПИД регулятора позволяет осуществлять регулирование скорости в широком диапазоне.

B. Регулятор скорости на базе нечеткой логики

Использование классического ПИД регулятора не позволяет получить максимального быстродействия с сохранением монотонного характера переходных процессов, поэтому было принято решения об использовании нечеткого регулятора.

При настройке регулятора была выбрана треугольная форма функций принадлежности, блок правил нечеткого регулятора приведен в табл. V. Для логического вывода был использован алгоритм Мамдани.

ТАБЛИЦА V БЛОК ПРАВИЛ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

		e						
		ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
$\frac{de}{dt}$	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н
	ОС	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ
	ОМ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС
	Н	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
	ПМ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ
	ПС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ	ПБ
	ПБ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ	ПБ	ПБ

Для сравнения работы регуляторов скорости рассматривается две настройки ПИД регулятора – стандартная, обеспечивающая монотонный переходный процесс и ускоренная, обеспечивающая большее быстродействие.

Графики для переходных процессов в различных точках для ПИД регулятора и нечеткого регулятора изображены на рис. 11–13.

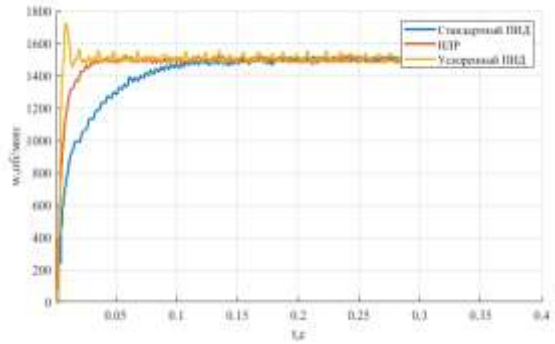


Рис. 11.Переходный процесс для скорости при ω_r=1500 об/мин

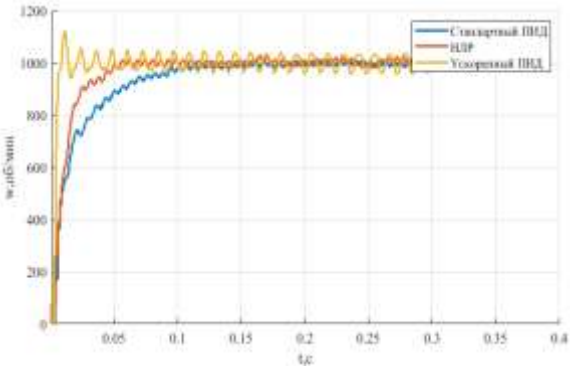


Рис. 12.Переходный процесс для скорости при ω_r=1000 об/мин

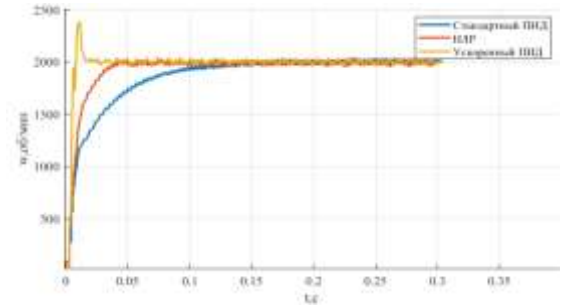


Рис. 13.Переходный процесс для скорости при ω_r=2000 об/мин

Как видно графиков нечеткий регулятор позволяет получить монотонный процесс с большим быстродействием, тогда как в системе с ПИД регулятором при попытке увеличить быстродействие появляется перерегулирование. При отклонении от номинальной точки быстродействие нечеткого регулятора уменьшается, однако остается больше, чем у ПИД регулятора. Также при увеличении быстродействия с помощью ПИД регулятора колебания скорости увеличиваются, что может пагубно сказаться на сроках эксплуатации двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика). СПб.: ЭФО. 2013. 63 с.

[2] Абузяров Т.Х., Плехов А.С., Дарьенков А.Б., Ермолаев А.И. Разработка модели систем высококачественного бесколлекторного электропривода постоянного тока // Вестник ИГЭУ. 2020. вып. 1. С. 31-45.

Система автоматической синхронизации синхронных генераторов с применением микроконтроллерной системы управления

С. А. Гринишена[1], А. А. Ким[2], Д. П. Михайлов[3]
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
[1]classicheartinside18@gmail.com, [2]aakim@stud.etu.ru, [3]dpmikhaylov@stud.etu.ru

Аннотация. **Представлена разработка устройства автоматической синхронизации синхронных генераторов с применением микроконтроллерной системы управления. Рассмотрены необходимые условия для безударного подключения на параллельную работу. Приведены структурная, функциональная и электрическая принципиальная схемы. Представлен алгоритм работы устройства. В перспективе предложенное устройство может позиционироваться как отечественный аналог зарубежных системы автоматической синхронизации генераторов.**

Ключевые слова: система автоматической синхронизации генераторов; генератор; сеть; синхронизатор; микроконтроллер; датчик напряжения

I. Синхронизация

Синхронизацией называется процесс включения нескольких генераторов переменного тока на параллельную работу. Условия для правильного включения на параллельную работу приведены ниже.

- уравнительный ток в первый момент синхронизации был минимальным;
- процесс синхронизации должен быть устойчивым.

Для безударного включения синхронных генераторов на параллельную работу необходимо выполнить следующие условия синхронизации:

- Равенство действующих значений напряжений: $U_1 = U_2$;
- равенство частот: $f_1 = f_2$;
- совпадение по фазе одноименных векторов фазных напряжений генераторов, а если по – другому: угол фазного сдвига должен быть равен нулю, т. е. $\varphi = 0°$;
- одинаковый порядок чередования фаз 3-фазных генераторов, например, A_1, B_1, C_1 у первого, A_2, B_2, C_2 у второго [1].

II. Разработка схем и выбор элементной базы

Обеспечение высокой эксплуатационной надежности проектируемого устройства во многом зависит от структуры проектируемой системы и выбора элементной базы. Применение принципов стандартизации и унификации при выборе элементов и конструировании позволяют значительно сократить сроки проектирования и изготовления устройства, а также стоимость производства и себестоимость выпускаемого изделия.

A. Структурная схема

На структурной (рис. 1) схеме изображены основные части устройства, их назначение, а также взаимосвязи между ними. [2].

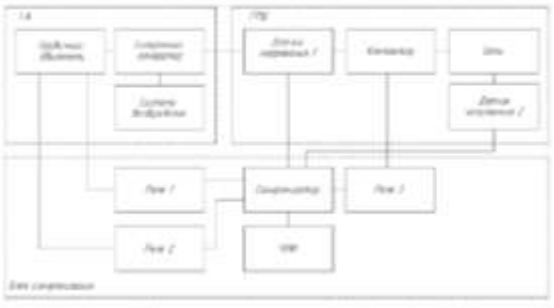


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической синхронизации генераторов

Структурная схема состоит из трех основных блоков:

- Генераторный агрегат

В генераторный агрегат входят первичный двигатель, синхронный генератор и система возбуждения.

- Главный распределительный щит

Главный распределительный щит состоит из двух датчиков напряжения (датчик напряжения 1 и датчик напряжения 2), контактора и сети.

- Блок синхронизации

В блоке синхронизации присутствуют три реле, синхронизатор и человеко-машинный интерфейс.

B. Функциональная схема

Функциональная схема позволяет разъяснить процессы, которые происходят как в отдельных функциональных цепях устройства, так и в устройстве в целом [2]. Функциональная схема проектируемого устройства представлена на рис. 2, где обозначено: ВИП – вторичный источник питания, СВ – система возбуждения, ОВ – обмотка возбуждения, ПД – первичный двигатель, СГ – синхронный генератор, ЧМИ – человеко-машинный интерфейс, ДН1 – датчик напряжения 1, ДН2 – датчик напряжения 2.

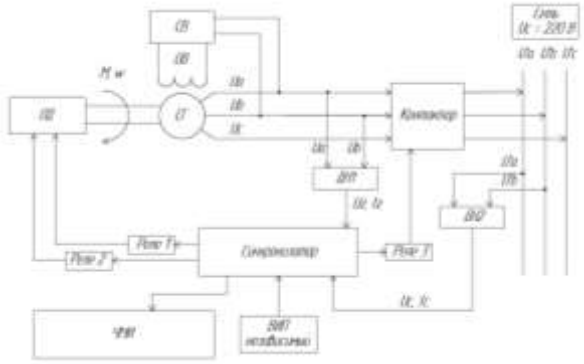


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматической синхронизации генераторов

ПД преобразует тепловую энергию сжигания топлива в механическую энергию. Далее механическая энергия поступает на СГ, преобразующий ее в электрическую энергию, которая поступает на контактор. СВ питает ОВ СГ. ДН отвечают за считывание значений напряжения, угла фазного свдига и частоты генератора и сети, а затем осуществляют передачу данных в синхронизатор.

Синхронизатор получает и обрабатывает данные о значениях напряжения, частоты и разности фаз. Если одно из условий синхронизации не выполнено синхронизатор посылает соответствующие сигналы на реле.

Реле 1 и реле 2 служат для передачи от синхронизатора сигнала «Больше/Меньше» на подачу топлива к ПД. Реле 3 является промежуточным и выполняет функцию замыкания контактора. ВИП осуществляет подачу электроэнергии на синхронизатор в случае отключения основного питания. ЧМИ служит для визуализации полученных данных из синхронизатора.

C. Принципиальная электрическая схема

Принципиальная электрическая схема проектируемой системы автоматической синхронизации генераторов представлена на рис. 3.

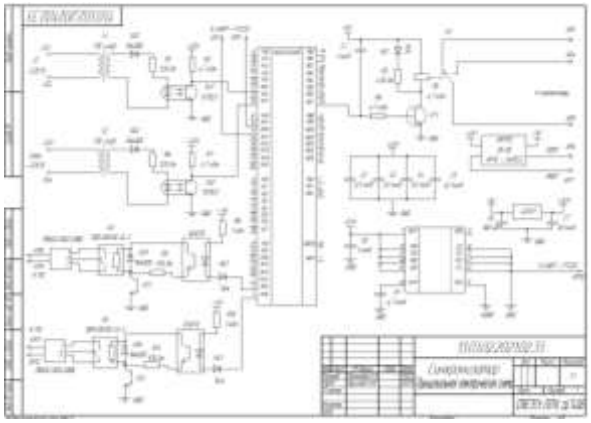


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема системы автоматической синхронизации генераторов

III. РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ

На основе разработанных схем и выбранной элементной базы было реализовано устройство автоматической синхронизации синхронных генераторов с применением микроконтроллерной системы управления, внешний вид действующего макета представлен на рис. 4.

Рис. 4. Устройство автоматической синхронизации синхронных генераторов

В качестве среды разработки программного обеспечения спроектированного устройства использовалась STM32CubeIDE. В разработке используется микроконтроллер STM32F446RE, его визуализация в STMCubeIDE представлена на рис. 5.

Рис. 5. STM32F446RE в STMCubeIDE

IV. Результаты исследования

Для проверки правильного функционирования устройства были проведены эксперименты по автоматической синхронизации генератора с сетью, результат приведен на рис. 6.

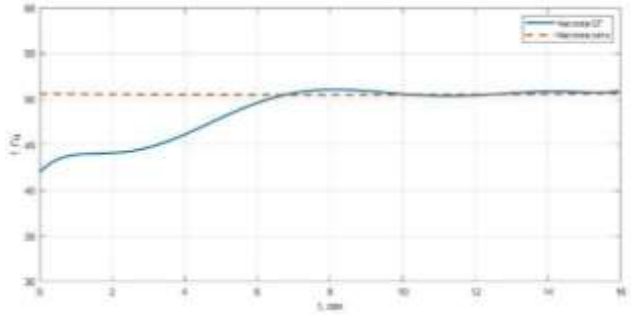


Рис. 6. График частоты при автоматической синхронизации генератора с сетью

Исходя из приведенного графика автоматической синхронизации генератора с сетью можно сделать вывод, что разработанная система функционирует правильно.

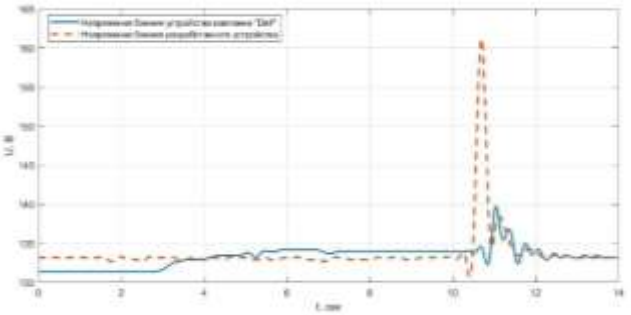


Рис. 7. График сравнения напряжения биений разработанного устройства с устройством компании «Deif»

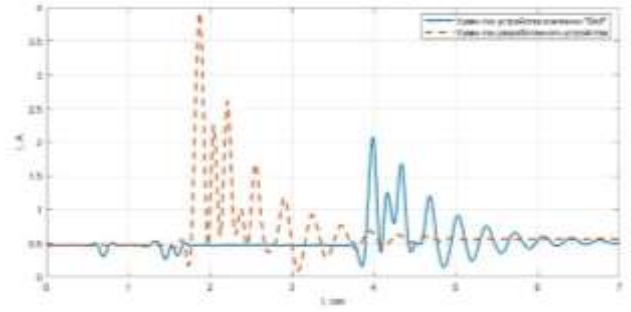


Рис. 8. График сравнения уравнительных токов разработанного устройства с устройство компании «Deif»

В случае сравнения уравнительных токов и напряжений биений, приведенных на рис. 8 и 7, с устройстом компании «Deif» можно сделать вывод, что характеристики устройств близки, однако разработанное устройство требует доработок.

Эксперименты по проверке правильности работы и надежности эксплуатации проводились в условиях «Учебно-научной лаборатории автоматизированных систем морского транспорта» кафедры САУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», в которой присутствует все необходимое оборудование, под руководством старшего преподавателя кафедры САУ А.Н. Лукичева.

V. Графическая визуализация

Для демонстрации правильности работы была разработана графическая визуализация работы устройства с помощью программного обеспечения MATLAB App Designer. Оператору предоставляется возможность выбора способа управления – ручное или автоматическое. Для получения данных о работе устройства и значений частоты необходимо подключить устройство через COM порт (UART). Статус подключения отображается, при нажатии кнопки «Подк./Откл.». ЧМИ разработанного устройства представлен на рис. 9.

Рис. 9. Графическая визуализация работы устройства автоматической синхронизации генераторов

Благодаря встроенным световым индикаторам ЧМИ демонстрирует подачу питания на устройство, сигнала с СГ и сети. Показывает значение напряжения сети и генератора. Стрелочные приборы служат для демонстрации изменения значений частоты СГ и сети, и их наглядного сравнения.

Список литературы

[1] Воскобович В.Ю., Королева Т.Н., Павлова В.А. Электроэнергетические установки и силовая электроника транспортных средств: Учебное издание / Под ред. Ю.А. Лукомского. СПб.: «Элмор», 2001. 384 с.

[2] ГОСТ 2.701-2008 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. Дата введения 01.07.2009. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200069439 .

[3] Токарев Л.Н. Дифференциальные уравнения (электрических цепей, машин, преобразователей): учебное пособие / Л.Н.Токарев. Санкт-Петербург, ЛИТЕО,2017. 264 с.

Повышение эффективности технического обеспечения угледобывающего предприятия с использованием метода экспертного оценивания (на примере Шахтопроходческого Управления «Восточное»)

А. А. Игнатенко
Санкт-Петербургский горный университет
ignatenko_nastya@bk.ru

***Аннотация*. Методы экспертных оценок являются одной из обширных составляющих системного анализа. Они являются неотъемлемой частью как при создании новых технических систем, так и при оптимизации уже существующих с целью улучшения качества системы.**

В статье представлены результаты выбора оптимального оборудования для выполнения различных работ на базе шахтопроходческого Управления «Восточное», филиала ООО «Приморскуголь».

Ключевые слова: экспертные оценки, модель, экскаватор, эффективность

I. Введение

Методы экспертных оценок являются одной из обширных составляющих системного анализа [3, 5]. Они являются неотъемлемой частью как при создании новых технических систем, так и при оптимизации уже существующих с целью улучшения качества системы [2, 7]. Рассмотрим применение метода экспертного оценивания технического обеспечения угледобывающего предприятия. В качестве объекта исследования была выбрана база технического оборудования шахтопроходческого управления «Восточное», филиала ООО «Приморскуголь».

ООО «Приморскуголь» является одним из ведущих угледобывающих объединений Дальнего Востока. Создано 18 марта 1943 г. на базе всех угледобывающих предприятий Приморья. В составе ООО «Приморскуголь» находятся разрезоуправление «Новошахтинское», производственная единица «Артемовское Ремонтно-Монтажное Управление» и шахтопроходческое управление «Восточное». Основные потребители угля в Приморском крае – объекты энергетики, жилищно-коммунальной сферы. Основные виды деятельности являются добыча угля открытым способом, дробление угля, сортировка, отгрузка угля потребителям в рядовом или сортированном виде в ж/д вагонах и «самовывозом» на автотранспорт.

Шахтопроходческое Управление «Восточное» – филиал Общества с ограниченной ответственностью «Приморскуголь». Местонахождение: Приморский край, Октябрьский район, пгт. Липовцы, ул. Ленина д. 2. Основными видами деятельности филиала являются проведение подземных горных выработок, добыча угля подземным способом и его переработка, предоставление услуг в других областях добычи полезных ископаемых.

II. Описание метода и математической модели

Под экспертными методами оценки понимают комплекс логических и математико-статистических процедур, направленных на получение от специалистов (экспертов) информации, ее анализ и обобщение с целью подготовки и выбора рациональных решений [1, 4].

A. Общие сведения о методе экспертной оценки

Гипотеза применимости метода экспертных оценок (МЭО) состоит в возможности использования экспертных оценок, обоснование их объективности базируется на том, что неизвестная характеристика исследуемого явления трактуется как случайная величина, отражением закона распределения которой является индивидуальная оценка специалиста достоверности и значимости анализируемого события [3, 6]. Предполагается, что истинное значение исследуемой характеристики находится внутри диапазона оценок, получаемых от группы экспертов, и что обобщенное коллективное мнение является достоверным (рис. 1).

Области применения метода экспертных оценок [1, 8]:

- принятие решений по сложным социальным, экономическим и политическим проблемам;
- определение перспективных направлений научных исследований и разработок;
- определение личностных и профессиональных качеств человека при назначении его на должность, оценка соответствия должности;
- отбор значимых факторов из множества допустимых (возможных);

- построение дерева целей, сценария будущего развития;
- анализ стратегий развития фирмы, организаций;
- прогнозирование НТП.

Рис. 1. Результаты экспертизы события: n – частоты, плотность распределения индивидуальных оценок характеристики; x – оценка характеристики исследуемого события [1]

Взаимосвязь между уровнем изученности явления и результатами экспертных оценок представлена на рис. 2.

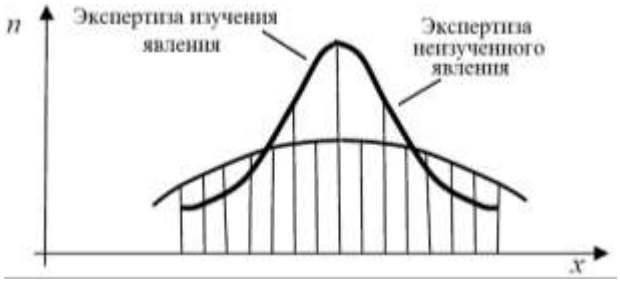


Рис. 2. Экспертные оценки в зависимости от уровня изученности явления [8]

Влияние овладения знаниями о явлении и вероятности достоверной оценки представлено на рис. 3.

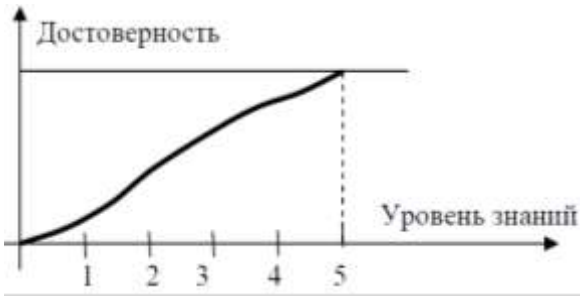


Рис. 3. Рост достоверности оценки: 1 – высказывание; 2 – суждение; 3 – мнение; 4 – аргументированное мнение; 5 – обоснованное знание (решение) [1]

Основные гипотезы МЭО:

- Экспертные оценки носят вероятностный характер и основываются на способности эксперта работать (принимать решения) в условиях неопределенности.
- При совместной работе нескольких экспертов истинное значение исследуемой величины находится внутри диапазона оценок отдельных экспертов.
- Коллективное мнение более достоверно и позволяет уменьшить дисперсию оценок, за исключением случаев полной неоднородности экспертов.
- За счет отбора, обучения, инструктажа, тренинга можно добиться однородности экспертов.

Разработка процедуры МЭО включает следующие этапы:

1. формирование целей экспертизы, вопросов;
2. формирование правил проведения опросов;
3. отбор группы экспертов;
4. выбор способа оценки компетентности экспертов;
5. выработка правил анализа и обработки мнений экспертов;
6. проведение экспертного опроса;
7. определение степени согласованности мнений экспертов (достоверности результатов);
8. анализ и обработка информации, полученной от экспертов.

Рис. 4. Разработка процедуры МЭО

B. Методы обработки экспертных оценок и выбор наилучшего решения относительно них

Экспертами составляется перечень характеристик объекта, от более приоритетных до менее приоритетных в данной ситуации. После чего каждой характеристике присваивается оценка её веса, которая рассчитывается по формуле Фишберна:

$$\alpha_i = \frac{2*(n-i+1)}{n*(n+1)}, \quad (1)$$

где n – количество критериев оценивания (характеристик объекта), i – порядковый номер от более приоритетной к менее приоритетной, α_i – вес оценки, $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1$.

Далее производится расчёт рангов r_{ij}, где i – номер критерия оценивания, j – номер объекта. В зависимости от того, к чему должен стремиться приоритетный показатель

данного критерия ((2) – «лучше–больше»; (3) – «лучше–меньше»), r_{ij} рассчитывается следующим образом:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_i^б} \quad r_{ij} = \frac{x_i^б}{x_{ij}}, \tag{2}$$

где x_{ij} – характеристика -ого объекта по i-ому критерию, $x_i^б$ – характеристика базового объекта по i-ому критерию. Заметим, что базовый объект – это один из объектов оценивания, выбранный на усмотрение ЛПР (лица, принимающего решение), все ранги которого автоматически приравниваются 1.

$$r_{iб} = 1. \tag{3}$$

Затем рассчитывается эффективность каждого объекта Q_j по формуле (4):

$$Q_j = \sum_{i=1}^{n} r_{ij}\alpha_i. \tag{4}$$

На основании полученных Q_j, ЛПР выстраивает возрастающую последовательность. Объект, эффективность которого стоит в начале последовательности – самый неэффективный, в конце – самый эффективный.

III. Решение демонстрационного примера, проведение расчетов

Оценим эффективность четырёх моделей экскаваторов, стоящих на базе шахтопроходческого управления «Восточное», в трёх видах деятельности, для которых они используются: выполнение вскрышных работ, выполнение добычных работ, выполнение вспомогательных работ (табл. I).

ТАБЛИЦА I ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИ ЭКСКАВАТОРОВ

		ЭКГ-12,5	**ЭКГ-5А**	**Hitachi EX-2500**	**Hitachi ZX-650**
		N_1	N_2	N_3	N_4
Вместимость ковша, м^3	r_{1j}	12,5	15	15	3,3
Наибольшая высота черпания, м	r_{2j}	13,5	16	16	11,9
Наибольший радиус черпания, м	r_{3j}	22,5	17	17	13,2
Эксплуатационная мощность, кВт	r_{4j}	800	1044	1044	345
Масса рабочая, т	r_{5j}	677	248	248	69
Время погрузки транспортной единицы, мин.	r_{6j}	3,7	2,3	2,3	9,5
Количество погруженных транспортных единиц в смену, шт.	r_{7j}	141	199	199	63
Годовая производительность, тыс. м3	r_{8j}	3691	5590	5590	1713

A. *Расчет эффективность имеющихся моделей экскаваторов для вскрышных работ*

От экспертов была получена следующая последовательность приоритетности технических характеристик для вскрышных работ:

$$\alpha_8 > \alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_6 > \alpha_7 > \alpha_4 > \alpha_3 > \alpha_5.$$

Проведём оценку веса каждой технической характеристики, согласно мнениям экспертов:

$$\alpha_8 = 0{,}222 \quad \alpha_7 = 0{,}111\alpha_2 = 0{,}194 \quad \alpha_4 = 0{,}083$$

$$\alpha_1 = 0{,}167 \quad \alpha_3 = 0{,}056\alpha_6 = 0{,}139 \quad \alpha_5 = 0{,}028$$

Рассчитаем ранги r_{ij} по (2) и (3), а также Q_j по (4). Полученные данные запишем в табл. II.

ТАБЛИЦА II РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

	N_1	N_2	N_3	N_4	α_i
r_{1j}	1	0,416	1,2	0,264	0,167
r_{2j}	1	0,76	1,185	0,88	0,194
r_{3j}	1	0,64	0,76	0,59	0,056
r_{4j}	1	0,313	1,305	0,43	0,083
r_{5j}	1	3,45	2,73	9,81	0,028
r_{6j}	1	0,43	1,6	0,39	0,139
r_{7j}	1	0,49	1,41	0,45	0,111
r_{8j}	1	0,51	1,5	0,46	0,222
Q_j	1	0,6	1,37	0,76	

На основании полученных данных составим следующую последовательность: $Q_2 < Q_4 < Q_1 < Q_3$.

Таким образом, можно утверждать, что наиболее эффективной моделью экскаваторов для вскрышных работ среди тех, что находятся на базе ШУ "Восточное", является экскаватор Hitachi EX-2500.

B. *Расчет эффективность имеющихся моделей экскаваторов для добычных работ*

От экспертов была получена следующая последовательность приоритетности технических характеристик для добычных работ:

$$\alpha_8 > \alpha_1 > \alpha_6 > \alpha_7 > \alpha_4 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_5.$$

Проведём оценку веса каждой технической характеристики, согласно мнениям экспертов:

$$\alpha_8 = 0{,}222 \quad \alpha_4 = 0{,}111\alpha_1 = 0{,}194 \quad \alpha_2 = 0{,}083$$

$$\alpha_6 = 0{,}167 \quad \alpha_3 = 0{,}056\alpha_7 = 0{,}139 \quad \alpha_5 = 0{,}028$$

Рассчитаем ранги r_{ij} по (2) и (3), а также Q_j по (4). Полученные данные запишем в табл. III.

На основании полученных данных составим следующую последовательность: $Q_2 < Q_4 < Q_1 < Q_3$.

Таким образом, можно утверждать, что наиболее эффективной моделью экскаваторов для добычных работ среди тех, что находятся на базе ШУ «Восточное», является экскаватор Hitachi EX-2500.

C. Расчет эффективность имеющихся моделей экскаваторов для вспомогательных работ

От экспертов была получена следующая последовательность приоритетности технических характеристик для вспомогательных работ:

$$\alpha_1 > \alpha_3 > \alpha_4 > \alpha_6 > \alpha_5 > \alpha_7 > \alpha_8 > \alpha_2.$$

ТАБЛИЦА III РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

	N_1	N_2	N_3	N_4	α_i
r_{1j}	1	0,416	1,2	0,264	0,194
r_{2j}	1	0,76	1,185	0,88	0,083
r_{3j}	1	0,64	0,76	0,59	0,056
r_{4j}	1	0,313	1,305	0,43	0,111
r_{5j}	1	3,45	2,73	9,81	0,028
r_{6j}	1	0,43	1,6	0,39	0,167
r_{7j}	1	0,49	1,41	0,45	0,139
r_{8j}	1	0,51	1,5	0,46	0,222
Q_j	1	0,56	1,39	0,71	

Проведём оценку веса каждой технической характеристики, согласно мнениям экспертов:

$$\alpha_1 = 0{,}222 \quad \alpha_5 = 0{,}111 \alpha_3 = 0{,}194 \quad \alpha_7 = 0{,}083$$

$$\alpha_4 = 0{,}167 \quad \alpha_8 = 0{,}056 \alpha_6 = 0{,}139 \quad \alpha_2 = 0{,}028$$

Рассчитаем ранги r_{ij} по (2) и (3), а также Q_j по (4). Полученные данные запишем в табл. IV.

ТАБЛИЦА IV РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

	N_3	N_4	α_i
r_{1j}	1	0,22	0,222
r_{2j}	1	0,74	0,028
r_{3j}	1	0,78	0,194
r_{4j}	1	0,33	0,167
r_{5j}	1	3,59	0,111
r_{6j}	1	0,24	0,139
r_{7j}	1	0,32	0,083
r_{8j}	1	0,31	0,056
Q_j	1	0,75	

Примечание: в расчётах не учувствуют экскаваторы ЭКГ-12,5 и ЭКГ-5А, так как не пригодны для вспомогательных работ.

На основании полученных данных составим следующую последовательность: $Q_4 < Q_3$.

Таким образом, можно утверждать, что наиболее эффективной моделью экскаваторов для добычных работ среди тех, что находятся на базе ШУ «Восточное», является экскаватор Hitachi EX-2500.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Залог развития – это совершенствование. Без него не было бы ничего. Именно желание усовершенствовать что-либо является движущей силой прогресса. Однако любое усовершенствование строится на основе оценки эффективности этого «чего-либо», так как именно благодаря ей принимается решение, нуждается ли «что-либо» в усовершенствовании, или нет.

Таким образом, оценка эффективности – основополагающая часть системного анализа. Именно от её результатов отталкиваются прочие отрасли системного анализа в своей работе. Главной целью оценки эффективности является выявление изъянов системы (при их наличии) для дальнейшего их устранения, а также нахождение оптимального решения для той или иной системы в данной ситуации. В ходе решения прикладных задач мы рассмотрели ситуацию, когда для одних и тех же объектов с идентичными техническими характеристиками выбор самого эффективного из них в различных условиях работы, различен. Также было доказано, что главным критерием, от которого зависит выбор наиболее эффективного образца в большинстве своём, зависит от экспертных оценок технических характеристик. На основе методов экспертной оценки и собранных данных о предприятии ООО «Приморскуголь» приведено решение для определения эффективного плана распределения оборудования на Шахтопроходческом Управлении «Восточное».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Данелян Тэя Яновна Формальные методы экспертных оценок // Статистика и экономика. 2015. №1. Стр. 183-187.

[2] Ильюшин Ю.В. Взаимодействие информационных потоков технологического процесса добычи высокопарафинистой нефти. В сборнике: Сборник трудов XI Международной конференции "Фундаментальные проблемы оптики – 2019". /Под ред. С.А. Козлова. 2019. С. 192-193.

[3] Основы системного анализа и управления: учебник / О.В. Афанасьева [и др.]. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. 552 с.

[4] Первухин Д.А., Григорьева Е.Д. Анализ деятельности промышленного предприятия по добыче и переработке драгоценных металлов с использованием информаионно-статистических методов. Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции. 2018. С. 58-63.

[5] Первухин Д.А., Лазебный В.С. Системное исследование деятельности промышленного предприятия по производству усилителей сотового сигнала ООО "Полоса частот". Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции. 2018. С. 50-58.

[6] Прохоров Ю.К., Фролов В.В. Управленческие решения: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 138 с.

[7] Boiko Y. Methods of forming an expert assessment of the criteria of an information system for managing projects and programs. Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions, 2018. P. 9-11.

[8] Ilyushin Yu.V., Afanaseva O.V. Development of SCADA-model for trunk gas pipeline's compressor station // Journal of Mining Institute. 2019. T. 240. C. 686-693.

Контроль и диагностика в производстве керамической плитки

Кадим Мохаммед Худаир
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
mokadhim@yandex.ru

***Аннотация*. В настоящее время наблюдается растущий спрос на керамическую плитку, широко использующуюся во многих областях. Хотя автоматизация производства плитки находится на достаточно высоком уровне, но контроль дефектов плитки перед ее выпуском производится в основном вручную.**

В статье предлагается метод автоматизированного контроля монохроматических плиток на наличие пятен на их поверхности. Разработанный алгоритм доказал эффективность и высокую скорость обнаружения дефектов.

Ключевые слова: керамическая плитка, дефекты, обработка изображений, ceramic tile, defects, image processing

I. Введение

Процесс производства керамической плитки достаточно сложен [1]. Здесь и штамповка, и обжиг до глазурования и после него, и транспортировка плитки с одной операции на другую. И на всех этих операциях могут возникать нарушения, которые отразятся на качестве выпускаемой плитки. В то же время требования к ее качеству определяются международными и государственными стандартами [2].

Завершающим этапом производства является визуальный осмотр и классификация керамической плитки. В большинстве случаев последняя фаза основана на способности человеческого восприятия. Ресурсы человека, как контролера на этом этапе, очень ненадежны. Поэтому эту операцию стремятся автоматизировать [3, 4].

Это не означает, что диагностику нужно проводить только на последнем этапе. Естественно очень важно соблюдать регламент на всех стадиях процесса. Мониторинг процесса и эффективный контроль готовой плитки позволит существенно повысить эффективность производства плитки в целом.

Описанные в литературе алгоритмы для выявления дефектов обычно занимают достаточно много времени на обработку изображений, что существенно ограничивает скорость контроля и требует установки нескольких постов контроля, работающих одновременно. Поэтому основное внимание уделено разработке скоростных алгоритмов контроля поверхностных дефектов готовой плитки.

На основании анализа литературных источников были выявлены основные поверхностные дефекты плитки, а именно: трещины, обскуры, пятна, сколы и др. [5, 6]. К сожалению, универсального алгоритма, выявляющего все возможные поверхностные дефекты плитки, не существует, хотя многие операции обработки могут быть одинаковыми для разных алгоритмов [7]. В данной работе рассматривается алгоритм выявления пятен на поверхности плитки.

II. Описание алгоритма

Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рис. 1. Первой операцией обработки является переход от полихромного изображения в монохромное полутоновое («оттенки серого»), что позволяет значительно ускорить дальнейшую обработку.

Затем следует целый ряд операций по формированию маски, сравнение с которой позволит выделить дефекты плитки. Для этого, прежде всего, производится бинаризация изображения, используя порог Отсу [8]. В этом случае, если интенсивность пиксела менее некоторого порогового значения, то пиксел обнуляется (становится черным), в противном случае – белым.

Для выделения на изображении области занимаемой собственно плиткой используется функция поиска контуров (cv2.findContours) [9]. В результате получаем изображение, включающее только область плитки, которое используется как маска. Поле маски должно быть очищено и заполняется белыми пикселями.

Теперь алгоритм опять возвращается к исходному серому изображению плитки, но уже уменьшенного размера, соответствующего изображению собственно плитки (без фона), равному изображению маски (рис. 2).

Т.к. исходное изображение, как правило, освещается недостаточно равномерно, контрастность в зонах дефектов также различна, то необходимо провести улучшение изображения, повысив яркость и контрастность.

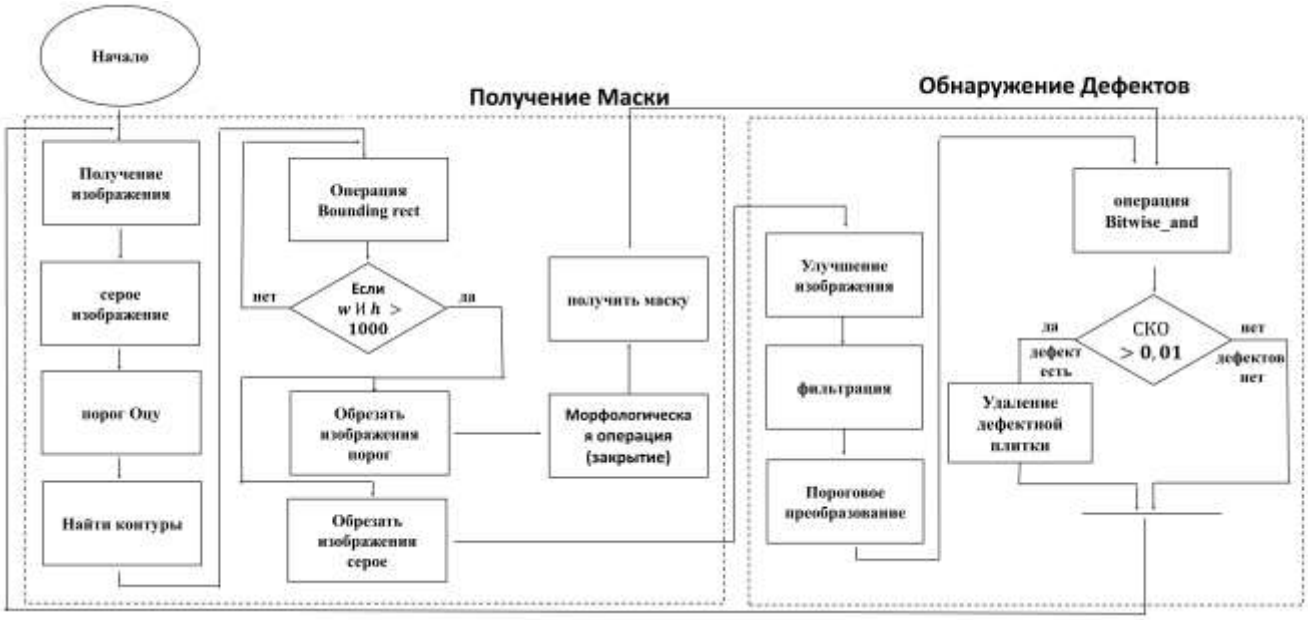


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Рис. 2. Слева – исходное изображение (видны горизонтальные полосы – границы ленты конвейера); справа – используемое после предварительной обработки во второй части алгоритме изображение собственно плитки, с малозаметным пятном продольной формы и контрастным точечным пятном (определяется алгоритмом для выявления трещин и царапин)

Идея повышения контраста заключается в увеличении динамического диапазона уровней интенсивности пикселей (расширению активной зоны гистограммы) при обработке изображения.

Удобно использовать простой метод линейного контрастирования, на основе преобразования исходного изображения вида [5]:

$$\begin{cases} y_{\max} = \alpha x_{\max} + \beta \\ y_{\min} = \alpha x_{\min} + \beta \end{cases} \quad (1)$$

где y_{max} и y_{min} – максимальное и минимальное значения интенсивности преобразованного изображения (при 8-ми байтном кодировании 255 и 0 соответственно); x_{max} и x_{min} – максимальное и минимальное (пороговое) значения интенсивности пикселей исходного изображения; α и β – коэффициенты. При этом α – влияет на расширение динамического диапазона, а β – параметр его сдвига на оси гистограммы.

Улучшить результат контрастирования можно, если предварительно отсечь «хвосты», хорошо видимые на интегральной кривой гистограммы, где число пикселей мало (например, менее 1–2 %). Это позволит определить x_{max} и x_{min}, найти из (1) α и β, и провести контрастирование для оставшейся части гистограммы. При этом отсечку удобно производить, задавшись процентной долей отсекаемой части интегральной кривой (clip_hist_percent). Если требуется повысить контраст низкоконтрастных участков плитки можно выделить и растянуть требуемую часть динамического диапазона исходного изображения. Участки, не попавшие в эту часть, будут черными. Чтобы найти светлые (близкие к основному тону плитки, а потому плохозаметные при визуальном контроле) дефекты на поверхности плитки, максимальное и минимальное значения интенсивности пикселей исходного изображения определяются в коротком диапазоне, близком к белому цвету, и могут быть: x_{max}=255; x_{min}=190. При этом, значение нижнего порога зависит от контрастности пятна.

Для удаления шума, часто имеющего в своем составе аномальные значения, в большинстве случаев используется нелинейная медианная фильтрация. В этом случае уровни яркости пикселей, которые принадлежат окну фильтра, ранжируются по возрастанию интенсивности (вариационный ряд). Центральному пикселу присваивается значение интенсивности среднего члена этого ряда (или полусуммы пары средних значений при четном числе пикселей в маске). Обычно окно выбирается размером 3x3 или 5x5 пикселей.

Для выделения дефектов также используется бинаризация изображения. Но в этом случае, для снижения требований к равномерности освещения плитки, предлагается использовать адаптивную бинаризацию с локальными порогами [10]. При этом в OpenCV предлагается для такой бинаризации использовать варианты вычисления локальных порогов по среднему

значению или по средневзвешенному значению интенсивностей соседних пикселей. Во втором случае веса w(i,j) определяются функцией Гаусса:

$$w(i,j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

Далее операцией по-пиксельного сравнения с маской с одновременным выполнением логической операции И (Bitwise_and) получаем изображение с выделенными дефектами на лицевой поверхности плитки (рис. 3).

Для определения дефектная плитка или нет, алгоритм подсчитывает среднеквадратичное отклонение СКО и сравнивает с порогом γ:

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}(I_{(i,j)} - K_{(i,j)})^2} \geq \gamma \quad (3)$$

где M, N – количество пикселей в строке и столбце соответственно; $I_{(i,j)}$, $K_{(i,j)}$ – интенсивности пикселей маски и обработанного изображения. Значение порога γ=0,01 было найдено экспериментально.

III. Полученные результаты

Обработка производилась в среде открытой библиотеки OpenCV с привлечением других библиотек, которые используются для анализа 2D-изображений [11]. Программа была написана на языке Python 3.7. В рабочей среде PyCharm 2019.3.5 (community edition). Требования к ПЭВМ: процессор: Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz.

Алгоритм успешно обнаруживал малоконтрастные пятна на поверхности плитки в 93 % случаев. Оценки времени на работу алгоритма приведены в таблице.

Рис. 3. Обработанное изображение плитки с пятном продольной формы

Остальные дефекты механического происхождения выявляются по отдельным алгоритмам [12].

ТАБЛИЦА I Затраты времени на обработку изображения одной плитки

Время (мс)*)	**Хорошие плитки**		**Дефектные плитки**	
	Кол-во плиток	***Процент***	***Кол-во плиток***	***процент***
Время ≤ 150	14	70 %	2	20 %
150 < Время < 175	6	30 %	5	50 %
175 < Время < 200	0	0 %	3	30 %

*) Общее время обработки включает время на построение маски, которое составляет примерно 500 мс и должно быть добавлено к времени на выявление дефекта.

IV. Заключение

Предложен метод и скоростной алгоритм обработки изображений однотонной плитки, эффективно выявляющий пятна на ее поверхности.

Метод отличается тем, что не требует предъявления эталонных плиток для выявления дефектных и при этом обеспечивает высокую скорость и эффективность классификации плиток на годные и дефектные.

Список литературы

[1] Suresh Padala, Ramyabindu V, Padmanabham P. Quality Control of CeramicTiles Using Image Processing // LAP LAMBERT Academic, 2012. 76p.

[2] ГОСТ 13996—2019. Плитки керамические. Общие технические условия (ISO 13006:2018, NEQ). М.: Стандартинформ, 2019. 42 с.

[3] Sanghadiya F., Mistr D. Surface Defect Detection in a Tile using Digital Image Processing // Analysis and Evaluation, International Journal of Computer Applications, 2015. Vol.116. No. 10. P. 33-37.

[4] Atiqur Rahaman G. M., Mobarak Hossain Md. Automatic defect detection and classification technique from image: a special case using ceramic tiles // International Journal of Computer Science and Information Security, 2009. Vol.1, No.1. P. 22-31.

[5] Jacob G., Shenbagavalli R., Karthika S. Detection of surface defects on ceramic tiles based on morphological techniques // URL: https://www.researchgate.net/publication/305616235 (Дата обращения 1.09.2021 г.)

[6] Rashmi Mishra, Chandrakar C.L., Mishra Ravi. Surface defects detection for ceramic tiles using image processing and morphological techniques // International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences, 2012. Vol. 2, No 2. P. 1307-1324.

[7] Karimi M.H, Aseman D. Surface defect detection in tiling Industries using digital image processing methods:Analysis and evaluation // ISA Transactions, 2014. V.53. P. 834–84

[8] Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

[9] cv2.findContours() function // URL: https://www.programmersought.com/article/82015048356/ (дата обращения 01.09.2021 г.).

[10] Dnyandeo S.V., Nipanikar R.S. A Review of Adaptive Thresholding Techniques for Vehicle Number Plate Recognition // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 2016. V. 5, No 4. P.944-946

[11] OpenCV Library URL: http://opencv.org .(дата обращения: 01.07.2021г.).

[12] Кадим М.Х., Русинов Л.А. Автоматизация контроля керамической плитки на наличие поверхностных дефектов механического происхождения // Материалы IV Международной научно-практической конференции «ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ» СПб., 2021. С. 3-9.

Адаптивное управление насосной системой нефтяных скважин

Р. В. Казанцев
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
Высшая школа технологии и энергетики
roman90091@yandex.ru

***Аннотация*. Успешная эксплуатация нефтяных скважин с помощью штанговых насосов достигается благодаря современным технологиям и методами, позволяющими контролировать производительность скважины. Однако наличие погрешностей в динамических моделях штанговых насосов или изменения параметров могут поставить под угрозу желаемую производительность системы управления и производительность системы штанговых насосов. Эти погрешности обычно связаны, например, с характеристиками жидкости в скважине, свойствами окружающей среды на дне скважины, электрическими компонентами и механическим устройством установки. Целью данной работы является использование устойчивого адаптивного контроллера для борьбы с некоторыми погрешностями в модели системы, изменениями параметров и наличием возмущений в системе автоматического управления уровнем скважины. Результаты, полученные в имитационной среде, показали, что адаптивный контроллер способен успешно справляться с погрешностями и изменениями, такими как, например, состав закачиваемой жидкости (вода, нефть и/или газ), что является весьма распространенной ситуацией на реальных месторождениях. Быстрый переход без колебаний также наблюдается в выходных сигналах установки и управляющих воздействий. Полученные результаты сравниваются с обычным ПИД-регулятором.**

Ключевые слова: адаптивное управление, нефтегазовая промышленность, автоматизация, производственный контроль, штанговые насосные системы

I. Введение

Система штанговых насосов является методом искусственного подъема, наиболее используемым в настоящее время в береговой нефтяной промышленности по причине простоты оборудования и установок. Этот метод также считается уже достаточно старым приемом, использованным для подъема нефти из скважин. Его популярность связана с низкой стоимостью затрат на инвестиции и обслуживание, возможностью глубокой добычи и откачки, хорошей энергоэффективностью и возможностью работы в различных по составу и вязкости жидкостях в широком диапазоне температур. Хотя этот метод подъема уже хорошо известен и широко используется, все еще существуют некоторые обстоятельства, при которых улучшение условий эксплуатации все еще возможно, особенно когда речь идет о реализации технологии управления производством насосного агрегата для повышения производительности системы. Разработка недорогих датчиков сделала возможным измерение забойных величин (забой – это нижняя часть скважины, служит для извлечения необходимого ресурса из недр земли), что способствует контролю производства, применению новых методов управления и улучшению автоматизации процесса. Наличие погрешностей параметров, изменений параметров динамики и возмущения является проблемой для системы управления и может поставить под угрозу эффективность обычного ПИД-регулятора. Целью данной работы является использование адаптивного управления с косвенной переменной структурой модели, основанного на решении этих задач в системе автоматического управления уровнем жидкости в затрубном пространстве (затрубное пространство – это кольцевое пространство между стенками скважины и обсадной колонной). Негативные эффекты, вызванные параметрами изменения и возмущения, связаны с некоторыми физическими параметрами системы или неисправностями электрических и механических компонентов. Эти эффекты могут поставить под угрозу успешную эксплуатацию контроллера насоса с последствиями для производительности системы по добыче нефти.

II. Штанговые глубинные системы насосов

В этом методе искусственного подъема вращательное движение тягового двигателя (электрического или двигателя внутреннего сгорания), расположенного на поверхности насосной установки, преобразуется в поступательное движение колонны штанг. Эта же колонна передает поступательное движение насосным компонентам, расположенным на дне скважины, которые отвечают за подъем жидкости из камеры на поверхность. Система штангового насоса может быть разделена на скважинное (подземное) и поверхностное оборудование (рис. 1).

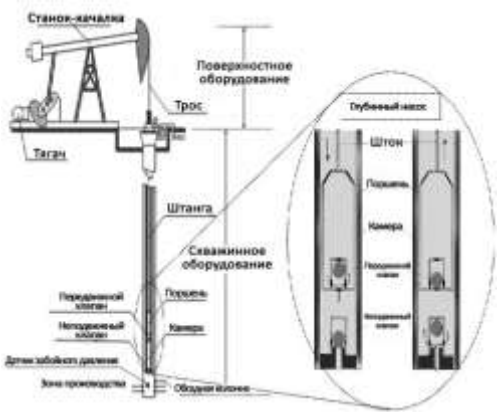


Рис. 1. Штанговая глубинная насосная система

Штанговая колонна является связующим звеном между насосной установкой, расположенной на поверхности, и скважинным насосом. Скважинный насос является разновидностью поступательного объемного вытеснения простого действия, другими словами, жидкость вытесняется в одном направлении. Функцией скважинного насоса является обеспечение энергией (повышение давления) жидкости из пласта. На рис. 2 представлена схема забоя скважины, а также кольцевая скважина и уровень входа в насос.

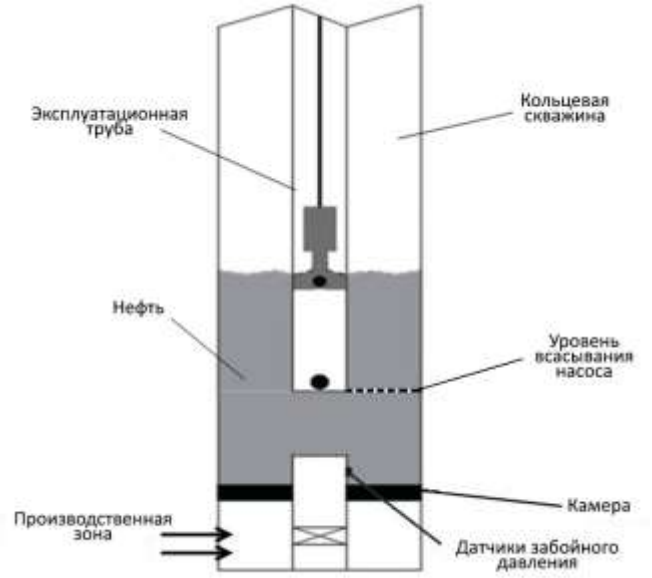


Рис. 2. Схема забоя скважины

Цикл откачки, создаваемый поступательным движением клапанов, влияет на забойное давление. Добыча нефти контролируется путем изменения скорости тягового двигателя, что подразумевает управление скоростью откачки, измеряемой в циклах в минуту. В этом способе управления используется метод привода с регулируемой скоростью. Это позволяет регулировать скорость перекачки с помощью преобразователя частоты. Важно отметить, что эффективность добычи связана с уровнем затрубной жидкости, и при работе с минимально возможным уровнем затрубной жидкости (минимальное забойное давление) отток пластовой нефти максимален. Целью управления является увеличение добычи нефти, избегая эффектов, вызванных погрешностью параметров, различиями параметров и возмущениями. Они обычно связаны с характеристиками жидкости в скважине, свойствами окружающей среды на забое скважины, электрическими компонентами и механическими узлами, например.

III. Метод управления

A. Адаптивный контроллер

В системах, собранных со штанговыми насосами, необходимо, чтобы рабочий режим был очень близок к уровню на входе насоса. Такой рабочий режим характеризуется полным заполнением насоса при минимально возможном забойном давлении. Это обеспечивает минимальное обратное давление на продуктивную зону пласта и, в свою очередь, увеличивает добычу нефти. В данной работе применен устойчивый адаптивный регулятор к штанговому насосу. Также необходимо, чтобы регулятор работал внутри диапазона. Более того, контроллер должен быть способен изменять параметры и обеспечивать устойчивость в случае изменения процесса, погрешности, колебаний и возмущений в системе.

Этот адаптивный контроллер обеспечивает простую конструкцию для реле, используемых в законах переключения алгоритма контроллера, поскольку эти реле будут непосредственно связаны с настройками системы. Эти параметры, в свою очередь, представляют собой взаимосвязи между физическими параметрами системы, такими как сопротивления, емкости, моменты инерции, коэффициенты трения и т. д., которые имеют заранее известные погрешности. Блок-схема, показанная на рис. 3, может проиллюстрировать общую идею использования адаптивного контроллера.

Рис. 3. Основная идея использования адаптивного контроллера

B. Математическое описание

Передаточная функция установки может быть описана следующим образом:

$$W(p) = k_w * \frac{n_w(p)}{d_w(p)}, \tag{1}$$

где k_w – коэффициент усиления на высоких частотах, n_p и d_p – простые полиномы, заданные в виде:

$$n_w(p) = p^{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i * p^{n-1-i}, \tag{2}$$

$$d_w(p) = p^n + \alpha_1 p^{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{i+1} * p^{n-1-i}. \tag{3}$$

Желаемый отклик, задаваемый передаточной функцией опорного сигнала, может быть записан следующим образом:

$$\frac{y_m(p)}{r} = M(p) = k_m * \frac{n_m(p)}{d_m(p)}, \quad (4)$$

где y_m – выходной сигнал эталонной модели. Предполагается, что входной сигнал r является частично непрерывным сигналом и равномерно ограниченным. Полиномы n_m и d_m определяются аналогично полиномам ОУ:

$$n_m(p) = p^{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{m,i} * p^{n-1-i}, \quad (5)$$

$$d_m(p) = p^n + \alpha_{m,1} * p^{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{m,i+1} * p^{n-1-i} \quad (6)$$

Вектор параметров установки задается как:

$$\theta_w = [k_w, \beta^T, \alpha_1, \alpha^T]^T, \quad (7)$$

где $\beta \in R^{n-1}$ содержит элементы $\beta_i (i = n-1, \dots, 1), \alpha_i \in R$ – элемент α_1в уравнении (3), и таким же образом задаются β_m,$\alpha_{m,1}$ и α_m в уравнениях (5) и (6). Когда параметры ОУ неизвестны или известны неточно, оцениваемый вектор задаётся таким образом:

$$\hat{\theta}_w = [\hat{k}_w, \hat{\beta}^T, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}^T]^T, \quad (8)$$

Для системы первого порядка вектор оцениваемых параметров:

$$\hat{\theta}_w = [\hat{k}_w, \hat{\alpha}_1]^T, \quad (9)$$

Уравнение ошибки между выходными сигналами ОУ и эталонной модели задается:

$$e = y - y_m \quad (10)$$

Если предыдущие предположения выполнены, то мы имеем условие совпадения, т. е. $y \rightarrow y_m$. Закон управления u может быть переписан как:

$$u = \theta_n y + \theta_{2n} * r, \quad (11)$$

$$\theta_n = \frac{\hat{\alpha}_1 - \alpha_{m,1}}{\hat{k}_w}, \quad (12)$$

$$\theta_{2n} = \frac{k_m}{\hat{k}_w}, \quad (13)$$

Параметры регулятора обновляются с помощью оценки параметров установки, что и характерно для адаптивного контроллера.

IV. Симуляция и анализ результатов

Для имитационного моделирования был использован специализированный программный комплекс, который положительно зарекомендовал себя для симуляции сложных объектов управления [2–5]. Из [1] взяты передаточные функции для динамической системы установки и ее эталонной модели, соответственно,

$$\textbf{ОУ}: W(p) = k_w * \frac{n_w(p)}{d_w(p)} = \frac{3{,}522 * 10^{-5}}{p + 6{,}973 * 10^{-4}}$$
$$\Rightarrow k_w = 3{,}522 * 10^{-5}; \alpha_1 = 6{,}973 * 10^{-4}$$

$$\textbf{Эталонная модель}: M(p) = k_m * \frac{n_m(p)}{d_m(p)} = \frac{3{,}874 * 10^{-5}}{p + 7{,}671 * 10^{-4}}$$
$$\Rightarrow k_m = 3{,}874 * 10^{-5}; \alpha_{m,1} = 7{,}671 * 10^{-4}$$

В этих моделях уровень в затрубной скважине (измеряется в метрах) рассматривается как переменная процесса (ПП), а скорость насоса (измеряется в циклах в минуту) – как управляемая переменная (УП). Параметры установки k_w и α_1, используемые в моделировании, имеют 10% погрешности от параметров эталонной модели. Начальные условия установки и эталонной модели были взяты разными, чтобы облегчить наблюдения свойств. В источнике [1] моделирование проводилось относительно опорного входа r, набора ступенчатых сигналов.

На рис. 4 видно, что модель эталонного сигнала заданный выход модели (желаемый отклик) был воспроизведен по выходу установки. Переменная процесса (уровень жидкости в кольцевой скважине) можно наблюдать на рис. 4 без колебаний в переходный период и стабильно в устойчивом состоянии.

Ошибка в устойчивом состоянии невелика и ограничена в соответствии с рис. 5, и управляющее воздействие также ограничено на рис. 6. Однако, рис. 6 показывает, что использование входного сигнала для предложенного регулятора является недопустимым. Таким образом, варианты решения для уменьшения явления вибрации нуждаются в дальнейшем изучении.

Симуляции выполнены для сравнения адаптивного контроллера с обычным ПИД-регулятором. Цель состоит в том, чтобы оценить устойчивость и адаптивные свойства контроллеров. При этом вводится 15 % отклонение в параметрах k_w и α_1 и шаг возмущения 20 % для переменных УП и ПП. Результаты показаны на рис. 7 и рис. 8.

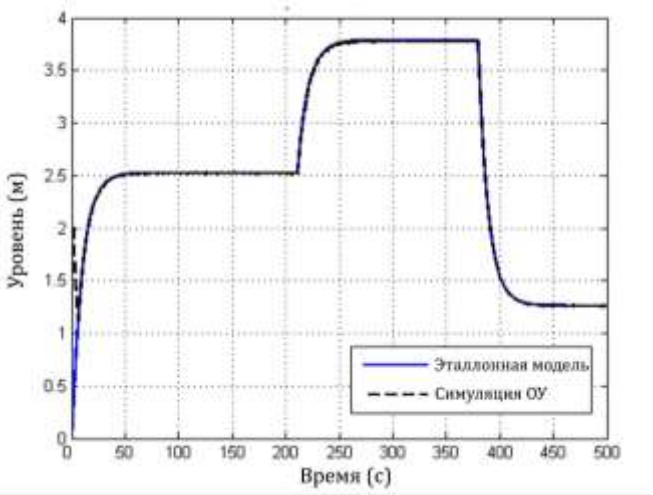


Рис. 4. Сравнение между выходными сигналами эталонной модели и ОУ

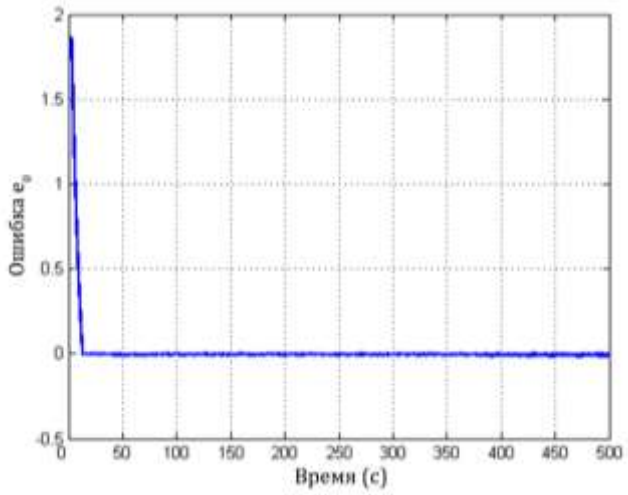


Рис. 5. Сигнал ошибки

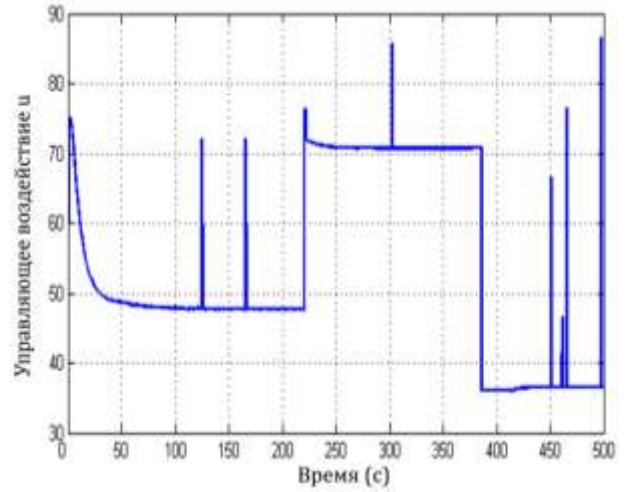


Рис. 6. Управляющее воздействие

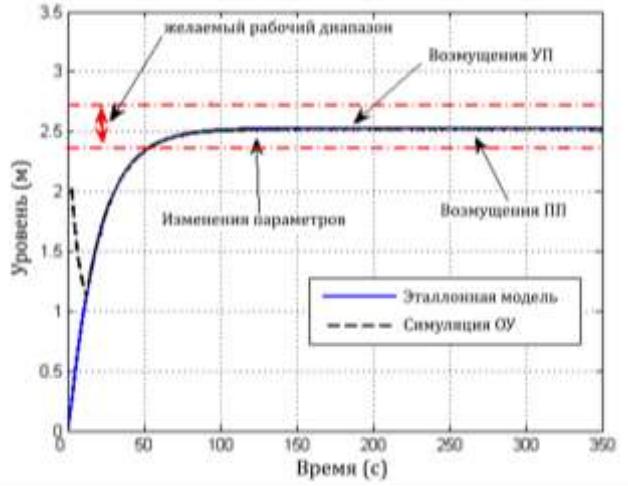


Рис. 7. Адаптивный контроллер с изменениями параметров и возмущениями

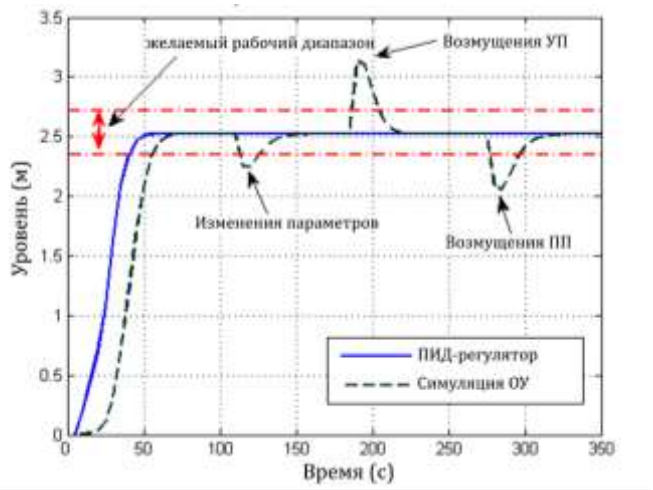


Рис. 8. Обычный ПИД-регулятор с изменениями параметров и возмущениями.

В этих симуляциях видно, что контроллеры отслеживают эталонную модель. Однако в системе управления с обычным ПИД-регулятором (рис. 8) изменения параметров и возмущения приводят к снижению производительности, отклоняя выход установки по отношению к эталону и желаемому диапазону работы. На рис. 7 потери производительности нет, и адаптивный контроллер демонстрирует устойчивость. Важно отметить, что за пределами рабочего диапазона добыча нефти ниже. Такое отклонение в производительности установки может также привести к образованию гидроудара. Явление гидроудара происходит из-за попадания воздуха в скважинный насос, когда уровень жидкости ниже уровня на входе в насос. Это явление влияет на добычу нефти и затраты на техническое обслуживание. Износ компонентов насоса также увеличивается из-за возникновения гидроудара.

Изменения параметров k_w и α_1 могут быть связаны с изменением состава жидкости (вода, нефть и/или газ), что является очень распространенной ситуацией на реальных месторождениях. Возмущения на ПП могут быть связаны с неисправностями в источнике питания преобразователя частоты. Возмущения на УП могут быть связаны с утечками движущихся и/или неподвижных клапанов.

V. Заключение

В данной работе устойчивый адаптивный контроллер был применен к системе штанговых глубинных насосов нефтяных скважин. Результаты моделирования и анализа показали, что желаемая характеристика, заданная образцовой моделью, отслеживается реакцией установки. Сигнал ошибки ограниченный и минимальный, и управляющее воздействие также небольшое, хотя уменьшение колебаний требует дальнейшего анализа. Результаты также показывают, что адаптивный контроллер способен успешно управлять уровнем жидкости в затрубной скважине, несмотря на наличие погрешностей модели, изменений параметров и возмущений. Более того, результаты показывают, что данный метод управления может повысить эффективность добычи и снизить затраты

на обслуживание (например, за счет предотвращения выливания жидкости). В качестве будущей работы рассматривается внедрение этого адаптивного регулятора в реальную физическую систему.

Список литературы

[1] Torres L.H.S. Modelling, Identification and Adaptive Control of Rod Pumping Systems for Oil Wells (in portuguese), 2012, M.Sc. Dissertation, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

[2] The Modeling of Mineral Water Fields Data Structure / A.A. Makarova, I.V. Mantorova, D.A. Kovalev, I.N. Kutovoy // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. Moscow, 2021. P. 517-521. DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396250.

[3] Satsyuk T.P., Sharyakov V.A., Sharyakova O.L. et al. Automatic Voltage Stabilization of an Electric Rolling Stock Catenary System. Russ. Electr. Engin. 92, 213–216 (2021). https://doi.org/10.3103/S1068371221040052.

[4] Ilyushin A.N. Development of Information Measuring Complex of Distributed Pulse Control System / A. N. Ilyushin, D. A. Kovalev, P. M. Afanasev // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01–04 октября 2019 года. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8934173. DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934173.

[5] Сацук Т.П., Шаряков В.А., Шарякова О.Л. и др. Об автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава // Электротехника. 2021. № 4. С. 36-40.

Исследование нейросетевого алгоритма голосовой биометрии

Е. Ю. Куликов
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
ekulikov@naint.ru

А. С. Попонин
ООО «ЕСТЕСТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ»
apoponin@naint.ru

***Аннотация*. Нейросетевые алгоритмы стремительно покоряют новые технологические области и помогают нам решать все больше и больше задач. В данной статье описывается современный алгоритм анализа голоса, исследуются его возможности для решения задач голосовой биометрии в различных шумовых условиях.**

Ключевые слова: нейронные сети, голосовая биометрия, речевые технологии

I. Введение

Последнее десятилетие с развитием ЭВМ и интернета появляется все больше и больше дистанционных технологий от колл-центров службы поддержки до дистанционного образования. В 2020 году в связи с пандемией и всемирным локдауном мы были вынуждены решать большое количество наших дел дистанционно, сидя дома.

При дистанционной работе важную роль играет безопасность. Вероятно все слышали про сервисы биометрической верификации и идентификации, можно смело предположить что такими технологиями пользуются большинство обладателей смартфонов, например *FaceID* или *TouchID* в *IPhone*, но когда речь идет об общении по телефону без возможности видеть и снимать отпечатки пальцев остается только один выход – определение личности по голосу, так как голос человека так же уникален как отпечаток пальца или сетчатка глаза [1].

Целью данной статьи является тестирование современных решений с открытым исходным кодом в различных шумовых условиях

II. Алгоритм анализа речи SpeakerNet

SpeakerNet [1] – относительно новый алгоритм, представленный компанией NVIDIA в октябре 2020 года, отличительной особенностью данной работы является хорошая оптимизация кода, отличная документация, но в некоторых случаях концепция, которой придерживаются разработчики фреймворка NeMo [2], мешает интеграции их решений в крупные системы.

A. Архитектурные особенности

Архитектура SpeakerNet основана на архитектуре алгоритма распознавания речи QuartzNet ASR [3], который компания NVIDIA представила в октябре 2019 года на конференции «ICASSP».

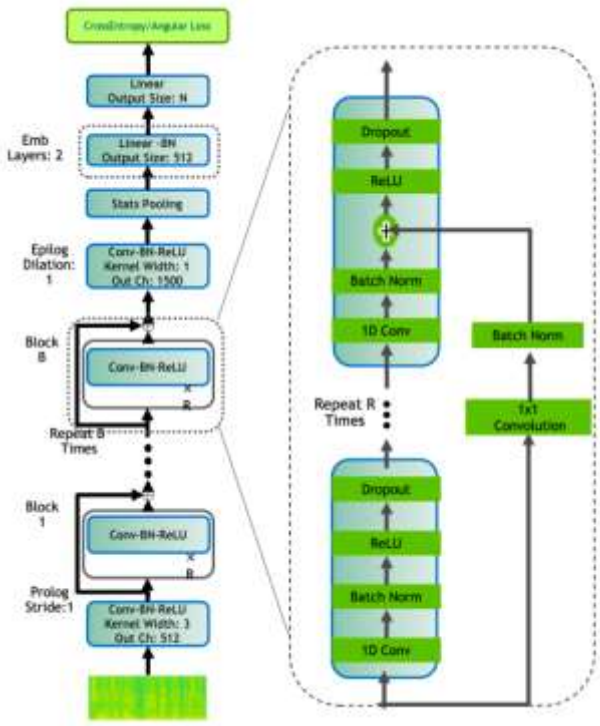


Рис. 1. Архитектура модели SpeakerNet

QuartzNet показал хорошие результаты работы и в результате архитектурных правок в родительскую архитектуру данный алгоритм был адаптирован под задачу распознавания спикеров и получил название SpeakerNet.

ТАБЛИЦА I SpeakerNet энкодер

Количество блоков	Тип блока	Размер сверточного ядра	Количество выходных каналов	Доля обнуляемых данных	Количество подблоков
1	Conv1	3	512	0.5	1
1	B1	7	512	0.5	2
1	B2	11	512	0.5	2
1	B3	15	512	0.5	2
1	Conv2	1	1500	0.0	1

Модель состоит из энкодера и декодера. Энкодер используется для извлечения акустических признаков верхнего уровня, которые передаются на уровень объединения статистических данных, где вычисляется среднее значение и дисперсию для каждого канала, чтобы

получить не зависящие от времени характеристики спикера.

Энкодер имеет следующую структуру (рис. 1): модель QuartzNet BxR имеет B блоков, каждый из которых имеет R подблоков, каждый из подблоков производит одноразмерную свертку, пакетную нормализацию, выпрямляющую функцию активации, которая обнуляет все отрицательные значения, а положительные оставляет в исходном виде, и Dropout слой, который обнуляет определенный процент входящих данных для предотвращения переобучения нейронной сети. Все подблоки имеют одинаковое количество выходных каналов. Эти блоки связаны между собой «residual connections», этот подход впервые использовался в нейронных сетях архитектуры ResNet и произвел революцию в области в свое время. В модели SpeakerNet используется энкодер с размерностью 3x2 и 512 выходных каналов и 2 дополнительных сверточных блока «Conv1» и «Conv2» (табл. 1).

Акустические признаки верхнего уровня, полученные из энкодера используются для вычисления промежуточных признаков, которые далее подаются в декодер для получения эмбединга говорящего по всей входной фразе.

Промежуточные признаки вычисляются при помощи слоя объединения статистических данных [4], где подсчитывается среднее и стандартное отклонение признаков по временным каналам, для получения независимое от времени представление размером Bx3000. Промежуточные признаки после слоя статистического объединения передаются на полносвязный слой с выходной размерностью 512 для большой модели и 256 для маленькой модели, с которого мы получаем представление говорящего со всей фразы, которое мы можем использовать в дальнейшем для задач верификации, и далее представление говорящего передается на финальный полносвязный слой с размерностью N (где N – количество спикеров в наборе данных), выход с которого мы можем использовать для задачи идентификации говорящего.

B. Аппаратные требования

ТАБЛИЦА II ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛИ SPEAKERNET

Вычислительное устройства	**Обьем памяти (Мб)**	**Скорость работы (образцов в сек.)**
Процессор	700	25
Nvidia GeForce 1080	4000	50
Nvidia GeForce 2080	1100	100

ТАБЛИЦА III РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ АУГМЕНТАЦИИ

Датасет аугментации	**VoxCeleb1 cleaned, EER(%)**	**VoxCeleb1, EER(%)**
-	2.85	2.99
MUSAN	**2.53**	2.7
RIR	2.64	2.8
MUSAN+RIR	2.89	3.02

Для исследования возможности использования данного алгоритма проводилось тестирование на 3-х типах устройств, результаты представлены в табл. 2.

C. Параметры обучения

Данная модель обучалась на датасетах VoxCeleb 1 и VoxCeleb 2 [5], максимальная длинна образцов на обучении была выбрана 8 секунд, если аудиодорожка меньше 8 секунд она дополнялась до необходимой длины, а если больше 8 секунд, то случаемым образом выбирался отрезок из этого аудио нужной длины. Длина 8 секунд была выбрана для сокращения времени обучения, примерно в 2 раза. Были протестированы разные длины образцов на обучении, после длины 8 тестовая ошибка почти не снижалась.

Так же при обучении использовалась аугментация различными шумами из датасетов Musan и RIR. Добавление шумовой аугментации в обучающую выборку уменьшила тестовую ошибку на 0.32 пункта (табл. 3).

D. Планирование эксперимента

Схема эксперимента приведена на рис. 2. Имеется модель SpeakerNet, на базе которой возможно спроектировать 3 вида систем: идентификация, идентификация с использованием алгоритма машинного обучения в блоке принятия решений и система верификации. В качестве регистрационных данных имеется 10 выборок различной длины, от 0.5 сек до 9 сек, каждая из которых аугментированна шумом с различными коэффициентами до 7 выборок, итого мы имеем 70 регистрационных выборок.

Аналогичная картина с тестовыми выборками, на каждую регистрационную выборку будет проводиться эксперимент со всеми тестовыми выборками, для 3-х систем итого получается:

70 регистрационных выборок * 70 тестовых выборок * 3 системы = 14 700 экспериментов.

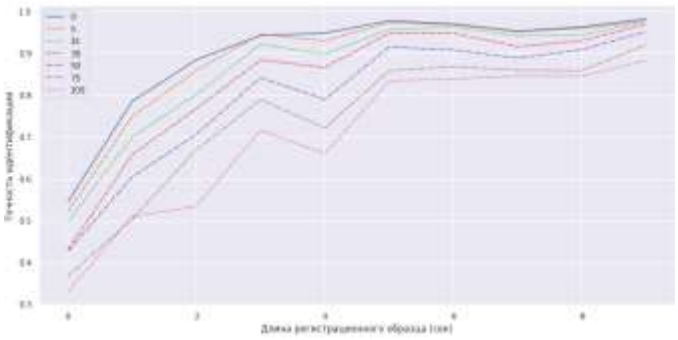


Рис. 2. График зависимости точности от длины регистрационного образца и уровня шума

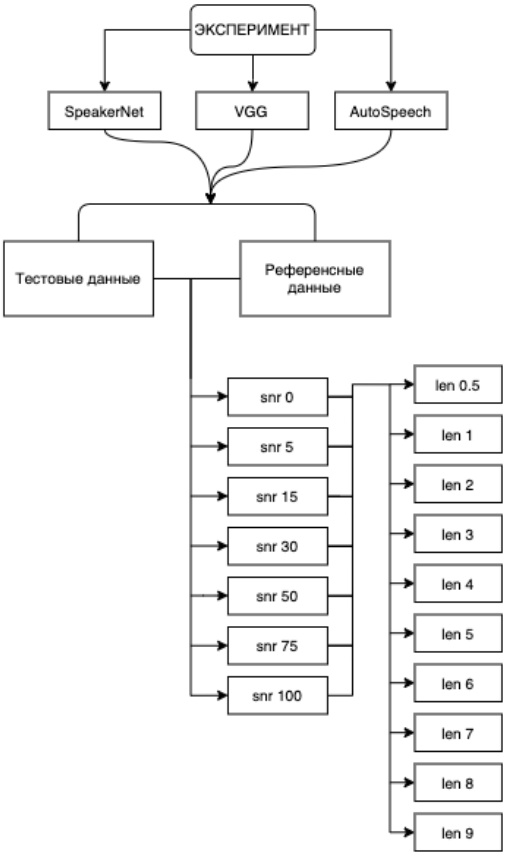


Рис. 3. Схема эксперимента

Эмбеддинги из аудиоданных извлекаются на графических процессорах Nvidia Geforce 2080 ti и Nvidia Geforce 1080. Обработка эмбеддингов и тестирование систем проводится на процессоре AMD Ryzen Threadripper 2920X в 24 потока на частоте 3500 МГц. Код написан на языке Python с использованием библиотек Numpy, Pandas, sklearn,multiprocessing.

E. Результаты тестирования SpeakerNet

На рис. 3–4 приведены результаты работы модели SpeakerNet в нескольких экспериментах. В каждой ячейке 3 значения: точность идентификационной системы на косинусном расстоянии, точность идентификационной системы на логистической регрессии, точность системы верификации.

Анализируя эти результаты можно однозначно сказать, что логистическая регрессия в 99 процентах случаев отрабатывает лучше косинусного расстояния.

На чистых данных модель показывает лучшие результаты в 98 процентов точности на обеих задачах при размере регистрационного образца 4 секунды, а тестового 9 секунд. Для задачи верификации лучшие результаты на чистых данных достигаются уже при 3х секундах на регистрацию и на тест. При полностью зашумленных данных система имеет 95 процентов точности на верификации и 82 на идентификации.

На рис. 4 представлены результаты тестирования при длине тестового образца 4 секунды и уровне шума 0, на графике видна прямая зависимость точности от длины регистрационного образца, но оптимальным размером будет 4–5 секунд речи. По этому графику хорошо видно влияние наличия шума в образце на точность идентификации. Наилучшие показатели модели SpeakerNet представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА IV НАИЛУЧШИЕ ПОКАЗАТЕЛИ SPEAKERNET

Задача	Длина регистрационного образца (сек.)	Длина тестового образца (сек.)	Уровень шума в регистрационном образце (%)	Уровень шума в тестовом образце (%)	Точность предсказания (%)
Идентификация 1	8	7	5	5	97.9
Идентификация 2	9	4	0	0	98
Верификация	6	5	5	0	98.6

	ref_len_0.5	ref_len_1.0	ref_len_2.0	ref_len_3.0	ref_len_4.0	ref_len_5.0	ref_len_6.0	ref_len_7.0	ref_len_8.0	ref_len_9.0
test_len_0.5	0.28 0.23 0.74	0.39 0.43 0.84	0.36 0.47 0.85	0.37 0.49 0.85	0.41 0.54 0.88	0.39 0.5 0.86	0.38 0.52 0.86	0.38 0.48 0.86	0.41 0.53 0.89	0.31 0.54 0.85
test_len_1.0	0.36 0.3 0.8	0.59 0.58 0.91	0.68 0.72 0.93	0.71 0.78 0.94	0.74 0.78 0.94	0.72 0.77 0.93	0.71 0.79 0.94	0.73 0.78 0.94	0.73 0.89 0.94	0.77 0.92 0.92
test_len_2.0	0.39 0.41 0.83	0.67 0.7 0.93	0.8 0.82 0.95	0.85 0.86 0.96	0.87 0.88 0.96	0.86 0.86 0.96	0.87 0.85 0.96	0.91 0.89 0.97	0.92 0.89 0.95	0.85 0.85 0.92
test_len_3.0	0.31 0.38 0.82	0.66 0.71 0.93	0.86 0.88 0.96	0.92 0.94 0.98	0.92 0.94 0.97	0.9 0.92 0.98	0.91 0.93 0.98	0.94 0.95 0.98	0.9 0.95 0.97	0.77 0.85 0.93
test_len_4.0	0.39 0.42 0.84	0.71 0.76 0.94	0.86 0.89 0.96	0.9 0.93 0.98	0.92 0.95 0.98	0.9 0.93 0.98	0.87 0.92 0.97	0.88 0.92 0.98	0.81 0.84 0.96	0.46 0.54 0.92
test_len_5.0	0.4 0.45 0.83	0.71 0.77 0.94	0.88 0.9 0.97	0.94 0.96 0.98	0.96 0.98 0.98	0.95 0.97 0.98	0.94 0.96 0.98	0.95 0.95 0.97	0.96 0.95 0.97	0.92 0.92 0.92
test_len_6.0	0.35 0.42 0.82	0.73 0.77 0.93	0.89 0.9 0.97	0.95 0.95 0.98	0.95 0.97 0.98	0.95 0.97 0.99	0.92 0.95 0.98	0.93 0.96 0.98	0.88 0.9 0.96	0.69 0.77 0.92
test_len_7.0	0.28 0.4 0.81	0.69 0.76 0.92	0.87 0.9 0.96	0.93 0.95 0.98	0.93 0.95 0.98	0.95 0.95 0.97	0.95 0.96 0.97	0.96 0.96 0.98	0.93 0.93 0.97	0.77 0.77 0.93
test_len_8.0	0.35 0.48 0.84	0.75 0.8 0.94	0.89 0.91 0.97	0.93 0.95 0.98	0.95 0.96 0.98	0.96 0.97 0.98	0.97 0.97 0.97	0.97 0.97 0.98	0.95 0.95 0.96	0.77 0.77 0.92
test_len_9.0	0.44 0.5 0.84	0.78 0.82 0.94	0.92 0.94 0.97	0.96 0.97 0.98	0.97 0.98 0.98	0.97 0.97 0.97	0.97 0.96 0.97	0.97 0.95 0.98	0.95 0.93 0.97	0.77 0.69 0.93

Рис. 4. Результаты работы систем без шума

Благодарность

Выражаем благодарность К.Э. Есалову и С.О. Шаляпину за помощь и предоставленные возможности для исследований.

Список литературы

[1] Nithin Rao Koluguri, Jason Li, Vitaly Lavrukhin, Boris Ginsburg «SpeakerNet: 1d depth-wise separable convolutional network for text-independent speaker recognition and verification» [Текст]

[2] Nvidia NeMo framework. [Электронный ресурс] URL : https://github.com/NVIDIA/NeMo

[3] S. Kriman, S. Beliaev, B. Ginsburg, J. Huang, O. Kuchaiev, V. Lavrukhin, R. Leary, J. Li, and Y. Zhang, “QuartzNet: Deep automatic speech recognition with 1D time-channel separable convolutions,” in ICASSP, [Текст] 2020 г.

[4] D. Snyder, D. Garcia-Romero, G. Sell, D. Povey, and S. Khudanpur, “X-vectors: Robust dnn embeddings for speaker recognition,” in ICASSP, [Текст] 2018 г.

[5] VoxCeleb DataSet [Электронный ресурс] URL : https://arxiv.org/pdf/1806.05622.pdf

Итеративный способ обучения нейронных сетей

А. С. Попонин
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
apoponin@naint.ru

Е. Ю. Куликов
ООО «ЕСТЕСТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ»
ekulikov@naint.ru

***Аннотация*. В статье описывается итеративный способ обучения нейронных сетей для задачи распознавания естественной речи в случае, когда размеченных данных мало. Приводятся программные возможности, позволяющие увеличить количество размеченных данных для обучения нейронной сети.**

Ключевые слова: обучение нейронных сетей, распознавание естественной речи, аугментация данных, итеративный алгоритм обучения

I. Введение

На сегодняшний день в компаниях существует потребность в оптимизации денежных и временных расходах. Многие компании внедряют в свою службу поддержки ИИ-системы, другие делают умные устройства. Примерами являются «Алиса» от Yandex, «Олег» от Tinkoff, «Маруся» от Mail, голосовой помощник от «Sber».

Замена сотрудников на ИИ-системы позволит не только сократить расходы на зарплаты, но и освободить людей от работы, которую может выполнять ИИ-система.

В данной работе будет описано как, имея небольшое количество размеченных данных, сделать систему распознавания речи, которая на сегодняшний день является востребованной системой как для широкого пользователя, так и для корпоративных нужд.

II. Данные

A. Качество данных

Первое о чем нужно говорить, когда стоит задача обучить ту или иную нейронную сеть, это данные. Для того чтобы обучить модель, нужно внимательно и ответственно подойти к сбору и обработке данных. Для задачи распознавание речи самым важным критерием качества данных служит полное соответствие текстовой транскрипцией аудиофайла с фактическим текстом, произносимым в аудиофайле. Другим важным фактором является само качество аудиофайла. В лучшем случае это один спикер, который говорит текст, совпадающий с текстовой транскрипцией этого аудиофайла. В аудиосигнале не должно быть два и более спикеров, которые говорят одновременно друг с другом, это может сильно «путать» нейронную сеть при обучении.

B. Объем данных

Для того чтобы получить качественную модель потребуется большой объем данных. В одной из работ [1] обращают внимание на важность количества данных, авторы использовали в своей работе 11940 часов размеченной речи. Собрать такой большой датасет в условиях, когда нет доступа к корпоративным данными, практически невозможно. К этому прибавляется еще и сложность ручной разметки. На 1 час разметки может понадобиться от 2 до 10 часов труда разметчика (влияют специфичность доменов, например медицинский, или наличие / отсутствие инструментов разметки сырых данных, например другая система распознавания речи). Однако в данное время ведутся научно-исследовательские работы, которые предполагают, что для получения качественной модели можно обойтись 1, 10, 100 часам размеченных данных. В статье про Wav2Vec2.0 [2] авторы приводят результаты, демонстрирующие успешность гипотез по использованию малого объема данных.

C. Ситуация на рынке данных

Большим компаниям, которые имеют в своём распоряжении огромные объемы размеченных данных, экономически невыгодно выкладывать свои датасеты в OpenSource. В итоге мы имеем ситуацию, когда ведущие команды по разработке *StateOfTheArt* решений отчитываются на идеализированном публичном датасете LibriSpeech [3], умалчивая о том, как работают их модели в реальных условиях. Следовательно, возникает входной барьер для тех, кто хочется создать свою систему распознавания речи. Для таких случаев есть открытые проекты такие как CommonVoice [4], однако данных для языков отличных от английского представлено достаточно мало.

III. Описание алгоритма итеративного обучения

Предложенный алгоритм будет полезен для частного разработчика или для компании, которая не имеет в своем распоряжении большое количество размеченных данных.

Суть алгоритма заключается в том, что на каждой новой итерации в *train* выборку добавляются новые данные, которые были размечены с помощью нейронной сети, получившейся на предыдущей итерации обучения. Такой подход дает возможность улучшать модель распознавания речи, не прибегая к коммерческим предложениям, датасетам.

IV. Эксперимент

Алгоритм применим к любой реализации нейронной сети для задачи распознавание речи, поэтому была выбрана реализация от компании *Nvidia* под названием *Jasper* [5].

Для проведения эксперимента были собраны размеченные русские данные из открытых источников в

размере 163 часов. Для искусственного увеличения размера данных была применена аугментация – изменение характеристик аудиодорожки, например ускорение или замедление. Это позволяет в разы увеличить стартовый объём размеченных данных. Примерная схема аугментации данных представлена на рис. 1.

Рис. 1. Аугментация данных

Для разметки данных после первой, второй и так далее итераций использовался открытый датасет русский речи *OpenSTT*[6], который насчитывает около 20 000 размеченных часов (на момент написания статьи). Датасет имеет свою разметку. Текст этой разметки сравнивался с текстом, полученным с обученной модели. Была рассчитана CER метрика для каждого образца датасета. Далее в *train* выборку были добавлены образцы, в которых метрика составляла CER < 15 %.

Данный эксперимент повторялся итеративно. С каждой новой итерацией в *train* выборку добавлялись новые размеченные данные.

V. Результаты

На графиках ниже представлены результаты проведённого эксперимента.

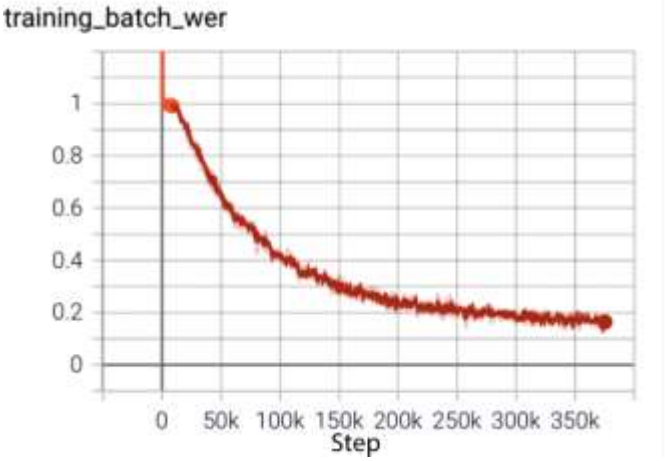


Рис. 2. Train WER итерация 1

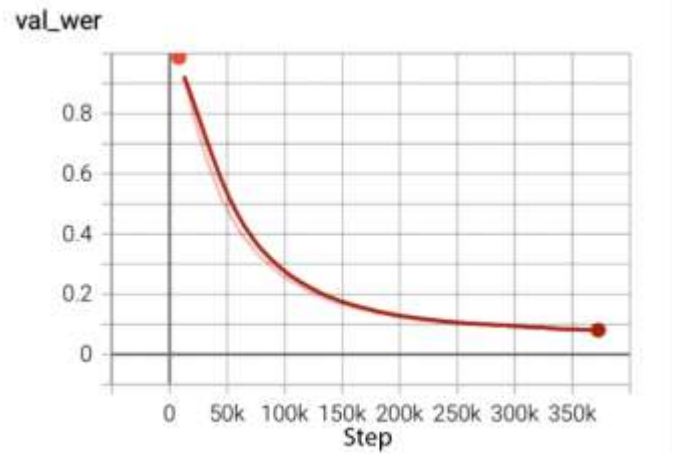


Рис. 3. Val WER итерация 1

Модель обучалась около 5 дней, после чего было принято решение добавить новые размеченные данные.

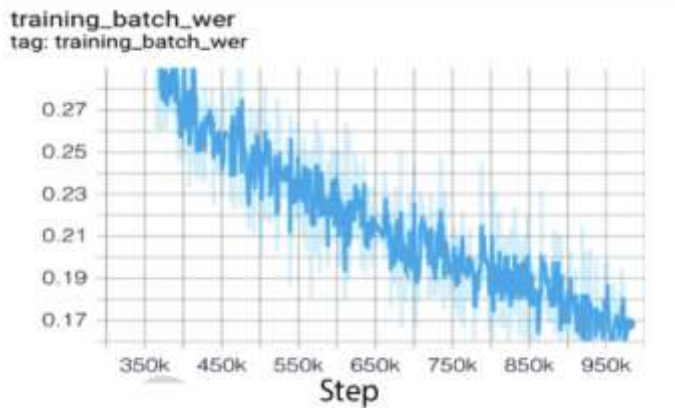


Рис. 4. Train WER итерация 2

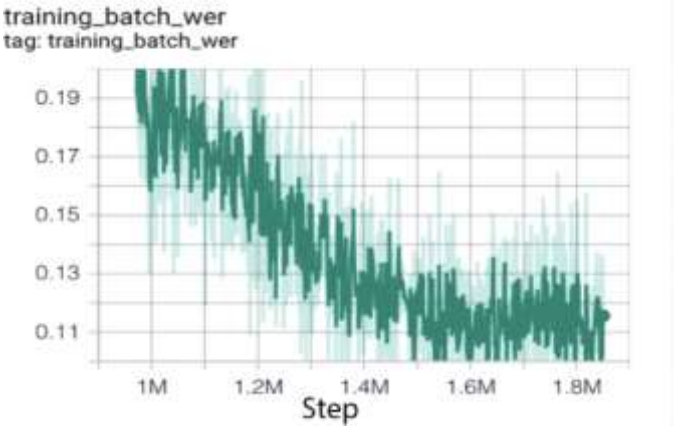


Рис. 5. Train WER итерация 2

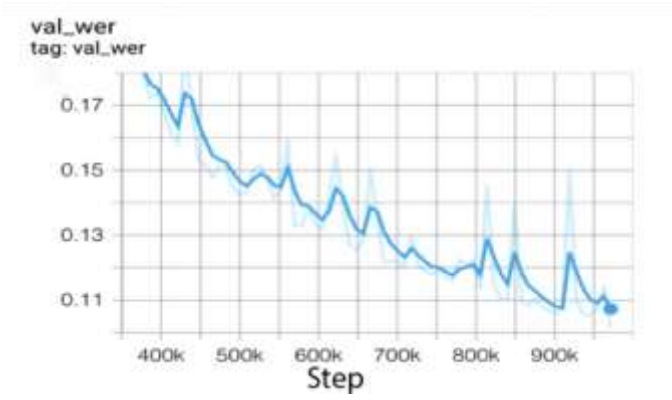


Рис. 6. Val WER. Итерация 3

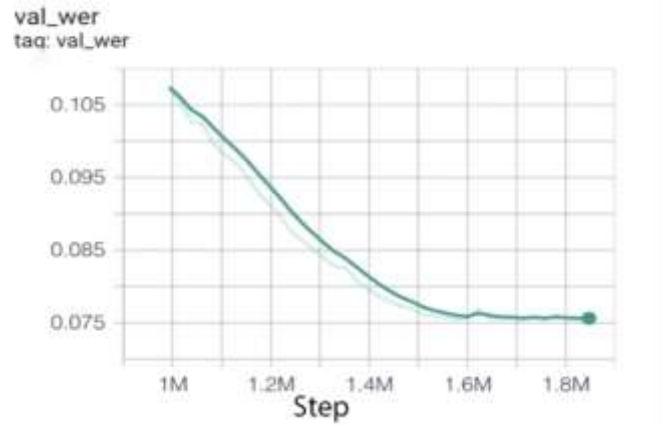


Рис. 7. Val WER. Итерация 3

На таких значениях ошибки каждое снижение даже на сотую долю является хорошим результатом, однако достаточно времязатратным.

Данный чекпоинт был проверен на тестовой выборке.

WER = 6.5264

Так как алгоритм является итеративным и никаких ограничений не имеет, то можно было продолжать фильтровать данные и добавлять их в *train* выборку.

VI. Выводы

Мировой рынок технологий распознавания речи оценен BCC Research в колоссальные $90,3 млрд в 2015 году. Ожидается, что этот рынок вырастет со $104,4 млрд в 2016 до $184,9 млрд в 2021 со средними темпами (CAGR) на уровне 12,1 % за период 2016–2021 [7]. Данные показывают о важности технологии, ее дальнейшей поддержки и о дальнейшем развитии.

Предложенный в работе алгоритм обучение может быть полезен как частным разработчикам, так и компаниям, которые не имеют большое количество корпоративных данных.

Благодарность

Выражаем благодарность С.О. Шаляпину и К.Э. Есалову за предоставленные вычислительные ресурсы и консультации по отдельным вопросам.

Список литературы

[1] Dario Amodei, Rishita Anubhai, Eric Battenberg, Carl Case, Jared Casper, Bryan Catanzaro, Jingdong Chen, Mike Chrzanowski, Adam Coates, Greg Diamos, Erich Elsen, Jesse Engel, Linxi Fan, Christopher Fougner, Tony Han, Awni Hannun, Billy Jun, Patrick LeGresley, Libby Lin, Sharan Narang, Andrew Ng, Sherjil Ozair, Ryan Prenger, Jonathan Raiman, Sanjeev Satheesh, David Seetapun, Shubho Sengupta, Yi Wang, Zhiqian Wang, Chong Wang, Bo Xiao, Dani Yogatama, Jun Zhan, Zhenyao Zhu «Deep Speech 2: End-to-End Speech Recognition in English and Mandarin» [Электронный ресурс] URL: https:// arxiv.org/abs/1512.02595

[2] Alexei Baevski, Henry Zhou, Abdelrahman Mohamed, Michael Auli «wav2vec 2.0: A Framework for Self-Supervised Learning of Speech Representations» [Электронный ресурс] URL: https://arxiv.org/abs/ 2006.11477

[3] Vassil Panayotov, Guoguo Chen, Daniel Povey, Sanjeev Khudanpur «LIBRISPEECH: AN ASR CORPUS BASED ON PUBLIC DOMAIN AUDIO BOOKS» [Электронный ресурс] URL: http: // www.danielpovey.com/files/ 2015_icassp_librispeech.pdf

[4] Common Voice is Mozilla's initiative to help teach machines how real people speak.[Электронный ресурс] URL: https: // commonvoice.mozilla.org/en

[5] Jason Li, Vitaly Lavrukhin, Boris Ginsburg, Ryan Leary, Oleksii Kuchaiev, Jonathan M. Cohen, Huyen Nguyen, Ravi Teja Gadde «Jasper: An End-to-End Convolutional Neural Acoustic Model» [Электронный ресурс] URL : https:// arxiv.org/pdf/1904.03288.pdf

[6] Russian Open Speech To Text (STT/ASR) Dataset [Электронный ресурс] URL : https://github.com/snakers4/open_stt

[7] Искусственный интеллект (мировой рынок) [Электронный ресурс] URL : https://www.tadviser.ru/index.php/

Особенности внедрения ERP-системы на авиаремонтном предприятии

А. Е. Лончина
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
sashalonchina@gmail.com

***Аннотация*. В статье рассматриваются особенности и сложности внедрения ERP-системы на авиаремонтном предприятии. Цель: охарактеризовать сложности, с которыми может столкнуться высокотехнологичное предприятие на этапе внедрения ERP-системы. Рассматриваемая тема будет интересна ИТ-специалистам предприятий, руководителям проектов по внедрению ERP-систем, специалистам в области бизнес-аналитики, проектирования систем, консультирования.**

Ключевые слова: ERP-система, бизнес-процесс, предприятие, номенклатура

По формальному определению авиаремонтное предприятие – предприятие по производству услуги ремонта авиатехники по заказу потребителей. Фактически авиаремонтное предприятие – полноправное производственное предприятие в системе промышленных комплексов производства авиационной техники, не уступающих по важности и сложности предприятиям-производителям авиационной техники. На авиаремонтных предприятиях используется технологическое сопровождение ремонта, выполненное разработчиками и производителями авиационной техники (руководство по ремонту), применяются средства технологического оснащения (далее – СТО), не уступающие СТО заводов-производителей. И наконец, на авиаремонтных предприятиях существует важнейший процесс определения технического состояния компонентов авиационной техники с помощью современных средств технической диагностики – дефектация, являющийся отличительной особенностью авиаремонтных предприятий, ввиду отсутствия данного процесса на заводах-изготовителях.

ОАО «558 Авиационный Ремонтный Завод» специализируется на ремонте и модернизации авиационной техники, стоящей на вооружении Республики Беларусь, а также стран ближнего и дальнего зарубежья. Основное направление деятельности предприятия – ремонт и модернизация самолетов и вертолетов [1].

На предприятии для автоматизации бухгалтерского учета используется несколько программных средств. Основные участки бухгалтерского учета автоматизированы в информационной системе на платформе 1С:Предприятие 7 (далее 1С 7). Кадровый учет, учет штатного расписания, учет рабочего времени и расчет заработной платы автоматизирован в информационной системе на платформе 1С:Предприятие 8.

Процесс планирования, диспетчеризации и управления производственным циклом по основному виду деятельности – ремонт и модернизация авиационной техники, выполняется по бумажной технологии. Для выполнения этих задач ответственные лица предприятия используют различные источники данных: данные из 1С 7, данные из первичных бумажных документов. Используемая система управления основными бизнес-процессами имеет существенные недостатки и как следствие, возникают ошибки в планировании, дефицит материалов и запасных частей, невостребованные остатки товарно-материальных ценностей на складах, низкая точность контроля сроков выполнения работ, задержки в результате несвоевременного обнаружения и регулирования перегрузок, затраты на сверхурочные работы, увеличение продолжительности цикла ремонта, низкая оперативность расчета плановой себестоимости и цены контракта, низкая точность и низкая детализация фактических затрат и фактической себестоимости, несоблюдение сроков закрытия отчетного периода и формирования бухгалтерской отчетности.

Для того, чтобы устранить вышеописанные недостатки в план развития предприятия на ближайшие годы включено внедрение автоматизированной системы управления предприятием (ERP-системы) на платформе 1С:Предприятие 8.

Основными ожидаемыми итогами внедрения являются:

- усовершенствование планирования и диспетчирования производства;
- сокращение объемов материальных запасов;
- сокращение случаев дефицита товарно-материальных ценностей;
- уменьшение производственного цикла ремонта авиационной техники.

Конечным итогом внедрения системы управления должно стать снижение себестоимости работ по ремонту и модернизации авиационной техники и повышение конкурентоспособности предприятия на рынке оказываемых услуг.

Проиллюстрируем особенности внедрения автоматизированной системы управления основных бизнес-процессов (ERP-системы), используя опыт ОАО «558 АРЗ».

A. Номенклатура

Базой для построения ERP-системы является подсистема управления нормативно-справочной информацией. Подсистема должна включать в себя функциональность по учету всей справочной информации, в том числе материальных и технологических спецификаций по ремонту авиационной техники. Основными видами нормативно-справочной информации являются справочник товарно-материальных ценностей (справочник «Номенклатура»), материальные спецификации и технологические спецификации по ремонту авиационной техники, справочник контрагентов, договоров контрагентов, справочник оборудования.

Справочник «Номенклатура» – один из ключевых справочников, в котором содержится информация о всех товарно-материальных ценностей, которые используются в производственной и хозяйственной деятельности предприятия. Каждая позиция товарно-материальных ценностей (далее – ТМЦ) (деталь, материал и т.д.) должна присутствовать в справочнике номенклатуры обязательно в единственном экземпляре, т.е. не должно быть дублей номенклатуры (когда одно и то же ТМЦ присутствует в справочнике несколько раз – под одинаковыми или разными наименованиями). Дублирование элементов справочника с изменением наименований недопустимо, так как элементы справочника являются аналитическим разрезом при выполнении анализа остатков, движений, потребности материальных ценностей, а также используются в материальных спецификациях, первичных складских и производственных документах.

В рамках функциональности ERP-системы система управления производственной нормативно-справочной информацией должна быть гибкой и универсальной и иметь следующую функциональность: для каждого типа авиационной техники в ERP-системе в виде иерархического дерева должен храниться перечень составных узлов или компонентов. Уровень вложенности дерева неограничен (рис. 1):

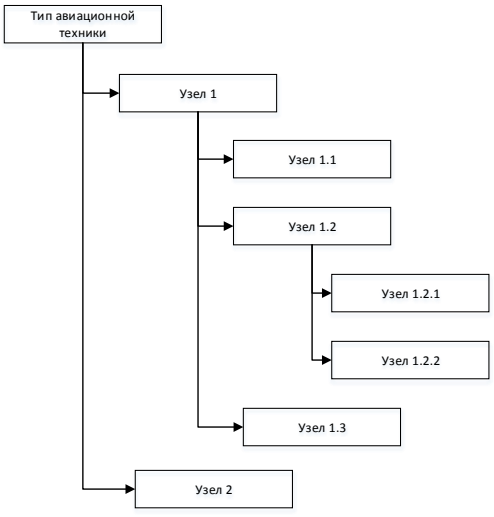


Рис. 1. Перечень компонентов авиационной техники, представленный в виде узла

В процессе внедрения ERP-системы предприятие столкнулось с серьезной проблемой – одни и те же ТМЦ присутствовали под разными наименованиями: отличающиеся названия были в складском учете, в нормах, в технической и нормативной документации, в контрактных документах, одни и те же ТМЦ от разных поставщиков поступали под разными наименованиями. Ситуация усугублялась тем, что даже в различной технической документации одни и те же детали и материалы имели различное наименование. Было необходимо провести масштабную работу по приведению всех дублей к одинаковому названию.

Номенклатуру целесообразно привести в порядок до начала внедрения ERP-системы, в противном случае это приведет к усложнению работ по внедрению, затягиванию сроков и дополнительным затратам на доработку функционала ERP-системы для работы в условиях отсутствия корректного справочника номенклатуры.

При этом нужно учитывать, что обработка номенклатуры должна затрагивать не только информационные системы. Корректные названия ТМЦ должны использоваться во всех документах предприятия, в том числе в контрактах с партнерами, нормах, внутризаводской технической документации, в противном случае в ERP-системе снова будут появляться дубли позиций ТМЦ с различающимися наименованиями. Рекомендуется, чтобы на предприятии действовали инструкции, обязательные для всех подразделений, описывающие правильное формирование наименований ТМЦ.

Также нужно понимать, что обработка номенклатуры – это не разовая работа. Порядок, наведенный в справочнике номенклатуры, необходимо постоянно поддерживать. Чем больше сотрудников имеют право создания новых записей, тем больше вероятность появления позиций с некорректными наименованиями. Поэтому право добавления новых позиций должно быть только у ограниченного круга лиц (3–4 человека, в зависимости от объема номенклатуры и документации на предприятии).

ИТ-специалистам предприятий, руководителям проектов по внедрению ERP-систем (от предприятия), специалистам в области бизнес-аналитики, проектирования систем, консультирования предлагается рассмотреть приведенный далее регламент работы с номенклатурой. На предприятии необходимо разработать стандарт организации, в котором должен быть отражен:

- перечень ответственных за формирование и ведение номенклатуры по группам (на период отсутствия ответственного назначается заместитель, правами на создание/редактирование справочника будут обладать только эти пользователи);
- порядок создания новых групп и видов номенклатуры;
- перечень правил создания в соответствии с настоящей инструкцией.

Процесс работы со справочником может быть организован следующим образом (рис. 2):

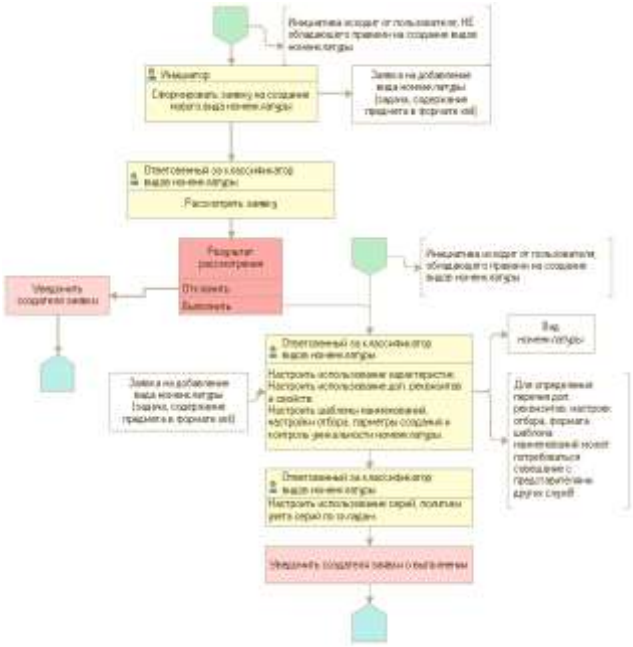


Рис. 2. Процесс работы со справочником номенклатуры

При возникновении необходимости в добавлении нового вида номенклатуры инициатор создает в системе заявку на создание нового вида номенклатуры. Ответственному за ведение классификатора приходит соответствующая задача. Ответственный может или отклонить задачу, или принять на выполнение.

Полезным может быть возможность распечатки действующей версии классификатора видов номенклатуры (для предоставления заинтересованным лицам, для выдачи ответственным за ввод номенклатуры).

B. Единицы измерения ТМЦ

Видеть реальный остаток ТМЦ на складах и в подразделениях предприятия невозможно, если одни и те же ТМЦ числятся в различных единицах измерения (например, в штуках и килограммах, в метрах и килограммах, в метрах квадратных и листах, и т. д.). Поэтому, одновременно с работой по приведению номенклатуры к стандартизированному виду, необходимо приводить остатки ТМЦ (а также все новые поступления) к одной единице измерения.

Для этого также необходима инструкция, обязательная для всех подразделений, разработанная на предприятии, описывающая, в каких единицах измерения должны храниться конкретные ТМЦ на предприятии. Требования этой инструкции должны учитываться, в том числе, и при разработке всей технической документации внутри предприятия.

В крайнем случае, если для некоторых ТМЦ невозможно определить одну единицу измерения, необходимо выделить минимальный набор единиц измерения и ввести реальные коэффициенты пересчета между ними.

Данную работу рекомендуется выполнить до начала внедрения ERP-системы, иначе это, как и в случае с номенклатурой, приведет к усложнению работ по внедрению, затягиванию сроков и дополнительным затратам на доработку функционала ERP-системы для работы в условиях хранения ТМЦ в различных единицах измерения.

C. Взаимодействие с разработчиком ERP-системы

При составлении технического задания на разработку и внедрение ERP-системы нужно стараться, чтобы оно было максимально подробным. В противном случае, плохо описанные моменты разработчик может трактовать в свою пользу. Для составления качественного технического задания необходимо время. В зависимости от особенностей производственных процессов предприятия этот срок может занимать до нескольких месяцев.

В процессе внедрения ERP-системы неизбежно выявление новых требований, не заявленных в техническом задании, либо изменение заявленных. В этих случаях необходимо каждое дополнение либо изменение описанного в техническом задании функционала внедряемой системы обсуждать с разработчиком – будут ли эти выполняемые работы рассматриваться в качестве дополнительных работ, оплачиваемых сверх заключенного договора, либо их стоимость войдет в изначальную сумму договора.

D. Организация работы на предприятии

ERP-система корректно функционирует только в том случае, если все задействованные в производственном процессе сотрудники выполняют свою часть работы в системе вовремя и качественно. Задержка или некачественная работа на одном участке неизбежно приводит к проблемам на других участках работы.

В процессе внедрения ERP-системы неизбежно происходит частичное перераспределение обязанностей между сотрудниками, меняются некоторые бизнес-процессы на предприятии. В связи с этим возникает необходимость оперативной корректировки стандартов предприятия.

Зачастую интересы одних подразделений пересекаются с интересами других подразделений. Поэтому при принятии решений об особенностях функционирования ERP-системы и изменении бизнес-процессов на предприятии необходимо учитывать мнение всех задействованных отделов, отдавая приоритет интересам основных производственных подразделений.

На этапе внедрения ERP-системы неизбежно увеличивается нагрузка на некоторые отделы. Поэтому необходимо продумать методы стимулирования труда этих сотрудников.

Для внедрения ERP-системы необходимо обновить устаревшую компьютерную технику, а также добавить

оборудование на участки, которые впервые задействуются для работы в информационной системе. Также может возникнуть потребность в специфическом оборудовании, таком как терминалы сбора данных или сканеры штрих кодов.

На предприятии должны быть специалисты, которые будут обслуживать серверное оборудование для ERP-системы. Также необходимо наличие специалистов, которые после завершения внедрения будут самостоятельно поддерживать и дорабатывать информационную систему (программисты). Для этих сотрудников нужно обеспечить соответствующую подготовку и обучение.

E. Выводы

Руководствуясь опытом внедрения ERP-системы на высокотехнологичном авиаремонтном предприятии, стоит отметить, что ИТ-специалистам предприятий, руководителям проектов по внедрению ERP-систем (от предприятия), специалистам в области бизнес-аналитики, проектирования систем, консультирования, на этапе предпроектного исследования и в процессе внедрения ERP-системы рекомендуется обратить внимание на:

- состояние и готовность справочника номенклатуры;
- организацию постоянной рабочей группы на предприятии по поддержке номенклатуры в рабочем и актуальном состоянии;
- ведение справочника номенклатуры должно выполняться централизованно, при создании новой позиции должен выполняться контроль наличия дублирующих записей;
- система управления производственной нормативно-справочной информацией должна быть гибкой и универсальной;
- создание регламентированной инструкции о порядке хранения и единицах измерения ТМЦ;
- коммуникацию и обмен информацией (доработки, недостатки, несоответствия, просьбы и т. п.) с разработчиком рекомендуется фиксировать в виде служебных записок, дополнительных соглашений, заранее обговаривая стоимость и план выполнения работ;
- при составлении технического задания для сложного по специфике оказываемых услуг предприятия желательно проводить комбинированные виды обследования бизнес-процессов предприятия: экспресс-обследование (можно запросить от нескольких ИТ-интеграторов) и полное обследование с участием рабочих групп от подразделений (лиц, которые наиболее точно разбираются в бизнес-процессах конкретного подразделения);
- высшему руководству необходимо комплексно подходить к вопросу мотивации всех звеньев управления автоматизированными данными (от мастера до директора).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] ОАО «558 АРЗ» сегодня. [Электронный ресурс]. URL: https://558arp.by/ru/ (дата обращения 01.08.2021)

Влияние качества данных на обучение нейронных сетей в задачах категоризации текста

Д. М. Лосева
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
d.m.loseva@gmail.com

***Аннотация*. Рассматривается вопрос влияния качества набора данных для обучения нейронных сетей для задач категоризации текста. Рассмотрены методы повышения качества и «чистоты» данных, приведены примеры с итоговыми показателями обучения. Сделаны выводы о влияние методов повышения качества данных на итоговый результат обучения.**

Ключевые слова: нейронная сеть; набор данных; очистка данных

I. Введение

Данные при обучении нейронных сетей играют не менее важную роль, чем сама разработка. «Что посеешь, то и пожнешь», как говориться в народной пословице. При этом если обеспечить высокое качество данных, то для высоких показателей работы нейронной сети даже не обязательно подавать на вход большую выборку для обучения. Нельзя совсем исключать особенности тестируемой нейронной сети, так как от нее тоже зависит многое, но качество данных может повлиять на результат даже сильнее, чем сам тестируемый алгоритм.

«Методы предварительной обработки данных обычно относятся к добавлению, удалению или преобразованию данных обучающего набора». [4]

II. Очистка данных

Обеспечить высокое качество данных, не зная их – невозможно. Если нет возможности привлечь людей, которые отлично разбираются в происхождении исследуемого набора данных, то на помощь приходят такие инструменты, как библиотека «Pandas» языка Python, который особенно популярен в задачах аналитики. Преимущество использования «Pandas» заключается в том, что за секунды можно получить основную информацию о наборе данных, не вникая в них, а именно: количество записей в наборе, уникальные значения, сумму, среднее, максимум, минимум, сделать группировку и агрегирование по любым параметрам. Также поддерживается слайсинг и анализ временных рядов. Всё это можно совместить с использованием библиотеки для визуализации (Matplotlib, Seaborn и др.), что помогает мгновенно получать четкое представление об обрабатываемых данных.

Особенно ценится то, насколько «Pandas» позволяет упростить процесс очистки данных. Очистка данных – это процесс выявления и корректировки пропусков и/или некорректных записей в наборе данных. Очистка данных является ключевым методом в подготовке данных к обучению. Такая процедура может потребоваться в следующих случаях:

- пропуски (отсутствие) значений;
- недопустимые значения и/или орфографические ошибки;
- выбросы;
- использование синонимов в задачах категоризации информации;
- запись множественных значений в одно поле;
- нарушение уникальности в ключевых полях;
- дублирование информации.

Если в наборе данных отсутствуют значения или, наоборот, имеются выбросы или дубли, то есть несколько способов решений: можно либо удалить строки с пропусками, либо заполнить их значениями, которые наиболее соответствуют логике исследуемого источника информации. Запись множественных значений в одно поле решается созданием дополнительных столбцов и разделением информации или же удалением ненужной информации из поля. Во всех остальных случаях достаточно произвести поверхностную корректировку информации.

Нельзя сказать, что все перечисленные возможности «Pandas» для работы с наборами данных являются уникальными решениями, но с помощью, например, Excel очистка данных будет вопросом не нескольких часов, а нескольких рабочих дней, при этом повышается вероятность совершения ошибки и пропуска какой-либо записи, требующей дополнительной обработки.

Существуют и средства для автоматизированной очистки данных, такие как Hive и Azure.

III. Список шумовых слов

Другим важным методом для обеспечения хороших показателей работы нейронной сети является составление и учет шумовых слов (стоп-слов) – это слова и части речи, которые не несут смысловой нагрузки. Есть большое количество готовых списков шумовых слов, но для каждой

задачи список должен корректироваться в зависимости от целей.

Например, в задачах технической поддержки в список шумовых слов можно включить слово «функция», так как пользователи под данным термином понимают самые разнообразные значения и его, скорее всего, не получится привязать к какому-то определенному ИТ-активу.

При анализе набора данных эмоциональной окраски рецензий на фильмы стоит включить слова «фильм», «сцена», «персонаж» и «история» в список шумовых слов, так как они будут встречаться практически в каждой записи и таким образом алгоритм может посчитать, что, например, у самого слова «фильм» есть эмоциональная характеристика.

Аналогичная ситуация с наборами данных, составленных из сообщений из социальной сети «Twitter» – часто в список шумовых слов есть необходимость добавить наименования аккаунтов и названия компаний, так как они не всегда несут смысловую нагрузку в контексте решаемых задач.

При тестировании нейронной сети для категоризации тестовой информации [3] на наборе данных, состоящем из СМС-сообщений с разметкой «spam or ham», были получены следующие результаты:

- без использования списка шумовых слов – максимальный процент распознавания 90,82 %.
- с использованием списка шумовых слов – максимальный процент распознавания 94,24 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что в задаче категоризации текстовой информации составление и учет списка шумовых слов при обработке поступающих данных является залогом успеха проекта.

IV. Особенности подготовки данных в зависимости от исследуемой нейронной сети

Подготовка набора данных зависит и от того, какая нейронная сеть исследуется. Например, алгоритм для категоризации текстовой информации [3], результаты работы которого уже приводились выше, не имеет сильной зависимости от языка, но не учитывает регистр и символы. Таким образом, если необходимо все-таки учитывать символы при анализе текста, то нужно предварительно заменить их словами-аналогами. Так как в данной нейронной сети регистр не учитывается, и нет возможности как-либо его интерпретировать в текстовом виде, то не рекомендуется использовать такую нейронную сеть с наборами данных, для анализа которых регистр букв будет иметь большое значение.

В контексте другого типа задач об этом написано в «Applied Predictive Modeling»: «Необходимость предварительной обработки данных определяется типом используемой модели. Некоторые процедуры, такие как древовидные модели, заметно нечувствительны к характеристикам данных предиктора. Другие, например линейная регрессия, – нет.» [4].

Другим важным фактором является структурированность данных. Для большинства нейронных сетей требуется хотя бы два столбца в наборе данных – исследуемая часть и категория.

V. Пример подготовки набора данных

Например, для подготовки набора данных для задачи автоматизации категоризации обращений, поступающих в техническую поддержку, нужно учитывать следующие особенности данных:

- Как давно ввели практику определения данной категории у запроса. Менялись ли правила определения категории? Из-за отсутствия четких регламентов, несмотря на то, что база данных может вестись уже много лет, данные до определенного периода могут оказаться неподходящими для обучения нейронной сети. Таким образом, учитывать данные можно только после того года, когда начали вводить необходимые регламенты и четко инструктировать сотрудников технической поддержки, благодаря чему качество данных повысилось в разы.
- Количество запросов в наименьшей категории. Как показал тест нейронной сети для автоматизации процесса категоризации [3] на разных выборках, при равномерном распределении запросов по категориям, получается наиболее качественная модель, даже несмотря на то, что выборка получится не такой большой. Поэтому если в наименьшей категории есть хотя бы 1000 запросов, то выборки по остальным категориям стоит сократить до числа наименьшей. Если же запросов в наименьшей категории меньше 1000, то стоит выровнять количество обращений в других категориях по второму наименьшему значению, и т. д.

Для данной выборки и алгоритма работы нейронной сети равномерное распределение запросов по категориям является одним из решающих факторов для обеспечения наилучшего результата обучения (Таблица).

ТАБЛИЦА I Влияние типа распределения на результат обучения

Тип распределения запросов по категориям	Размер обучающей выборки	% верного определения категории
Неравномерное	33 326 записей	68,98
Равномерное	12 916 записей	78,95

- Величину обучающей выборки. Чем больше обучающая выборка – тем лучше.
- Насколько корректна выборка. При возможности, стоит проводить поверхностную «чистку» данных, т. е. исключать запросы, в которых меньше 6 символов, заведомо неверно категорированные (например, новым сотрудником до получения необходимого опыта), тестовые обращения для

проверки работоспособности системы, запросы, состоящие только из ФИО и т. д. Так, например, если есть уверенность, что не может быть инцидента, в тексте запроса которого содержится слово «тонер», то необходимо исключить заявки, в которых содержится данное слово, из обучающей выборки.

- Сложность данных. Если есть возможность, то для каждой категории стоит делать отдельную выборку, а также отдельную выборку по всем вариациям в ней. Так можно добиться наиболее «чистой» обучающей выборки.

VI. Заключение

Подготовка данных часто занимает до 80 % времени, которое было затрачено на тестирование нейронной сети, особенно если это касается задач по обработке текстовой информации. Это очень важный этап, от которого зависит итоговый результат напрямую. Для того, чтобы обеспечить высокое качество исследуемого набора данных, нужно обязательно проверить 3 параметра:

- структурированность данных;
- чистоту данных;
- список шумовых слов;
- особенности тестируемого алгоритма (учитываются ли символы, регистр, язык и т. д.).

Вам может повезти и какой-то из пунктов можно будет только проверить, а не обеспечивать, но проверку проводить необходимо в любом случае.

Изложенные принципы работают и для задач анализа наборов данных других типов, но с учетом своих нюансов: например, необходимо проверять попадаются ли записи в диапазон допустимых значений или в каком формате предоставлены файлы для анализа.

Список литературы

[1] Николенко С.И., Кадурин А.А. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2020. 480 с.

[2] Ын А., Су К. Теоретический минимум по Big Data. Всё что нужно знать о больших данных. СПб.: Питер, 2019. 208 с.

[3] Daria M. Loseva, Anton I. Kondratiuk. Neural Network Development for IT-users Requests Processing // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), January 27 - January 30, 2020, St.Petersburg, 2020. p. 743–745.

[4] Max Kuhn, Kjell Johnson. Applied Predictive Modeling. 2nd printing 2018 edition. New York, USA: Springer Science+Business Media, 2018, 613 p.

Нейросетевая диагностическая модель стадии отделения светлых нефтепродуктов установки ЭЛОУ-АТ-6

Д. Лукашонокс
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
dimaq17@gmail.com

***Аннотация*. Повышение эффективности работы установок первичной переработки нефти, а также высокие требования к безопасности их эксплуатации стимулируют внедрение систем мониторинга и диагностики. Анализ результатов эксплуатации Центра мониторинга и диагностики Московского НПЗ показал, что своевременное обнаружение отказов технических средств автоматизации снижает риски развития потенциально опасных ситуаций и позволяет уменьшить частоту ложных обнаружений нештатных ситуаций [1]. Выявление и идентификация последних требует обобщенного анализа совокупности технологических показателей с учетом экспертных знаний о проявляющихся нарушениях. Учитывая непрерывный характер протекания процесса переработки нефти и возможность одновременного проявления нескольких нарушений, в качестве основы диагностической модели была выбрана многоуровневая нейросетевая структура [2].**

Ключевые слова: отделение светлых нефтепродуктов; нейросетевая диагностическая модель; диагностика состояния установки ЭЛОУ-АТ-6

I. ЭЛОУ-АТ-6, КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИКИ

Учитывая расширение функциональных возможностей автоматизированных систем управления при переходе на уровень цифровой Индустрии 4.0, становится актуальным вопрос внедрения систем, целью которых является повышение безопасности эксплуатации.

Установка первичной переработки нефти ЭЛОУ-АТ-6, эксплуатируемая на НПЗ предприятия ООО «КИНЕФ», включает несколько взаимосвязанных блоков: ЭЛОУ, который предназначен для обессоливания и дегидратации, блок АТ (атмосферной перегонки), который состоит из двух ректификационных колонн К1 и К2, блок для стабилизации и вторичной перегонки бензиновой фракции, блок защелачивания и промывки. Предварительный испаритель К-1 используется для отделения газа и легких бензиновых фракций. Из колонны К-1 обензиненная нефть прокачивается через печи Т-1А и Т-1В. Затем в колонне К-2 проходит ее дальнейшее разделение на фракции светлых нефтепродуктов и остаточного мазута [3].

Весь технологический процесс относится к классу потенциально опасных и связан с переработкой сернистых нестабильных нефтей с содержанием серы до 2,0 % и растворенных нефтяных газов до 2,5 %. В технологической схеме присутствует много обратных связей, что осложняет восприятие нештатных ситуаций и выявление источника возникновения нарушения. Кроме того, анализ статистических данных и результаты экспертного опроса показали, что ощутимое возмущение после варьирования расхода входного потока вносят изменения в тепловой режим. Поэтому при декомпозиции объекта в основу была положена технологическая последовательность операций, при которой в укрупненные блоки включалось оборудование для поддержания теплового режима и отвода нефтяных фракций. К блоку К1 относятся: печь П-1/1, конденсаторы Т5А-Т5В, сборник орошения Е1А и холодильник Т5. К колонне К2 в обвязку включены две отпарные колонны К6 и К7, атмосферные печи Т1А, Т1В и сборник орошения Е3 [4]. Выделенные блоки представлены в верхней части рис. 1.

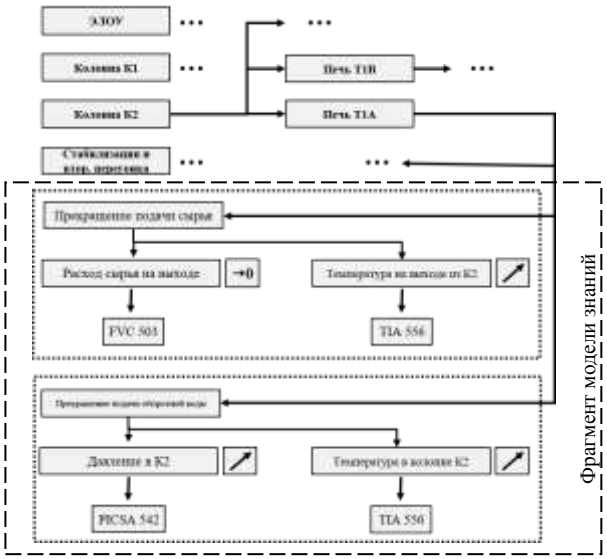
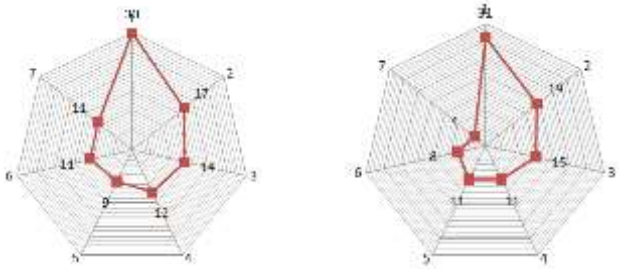


Рис. 1. Результаты декомпозиции установки ЭДОУ-АТ-6

II. СБОР, АНАЛИЗ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

Формирование базы знаний для рассматриваемого потенциально опасного технологического процесса целесообразно начать с анализа причин возникновения аварий. Согласно статистическим данным, по НПЗ, отказы можно разделить на два класса [5, 6]. На рис. 2*а* приведены причины аварий: 1 – выход продукта через сальники и

прокладки, 2 – нарушение режима эксплуатации, 3 – некачественный монтаж, 4 – коррозия, 5 – прогар труб, 6 – переполнение промканализации, 7 – прочие. На рис. 2*б* проведено ранжирование технологического оборудования, источника аварий: 1 – трубопроводы, 2 – насосные станции, 3 – теплообменники, дегидраторы, 4 – печи, 5 – ректификационные и вакуумные колонны, 6 – промканализация, 7 – резервуарные парки.



а б

Рис. 2. Диаграммы процентного соотношения аварий

Как видно лидирующие позиции занимают разгерметизация трубных соединений и нарушения режимов эксплуатации насосных агрегатов, вследствие чего появляются парогазовые облака или разливы нефти. При этом источниками воспламенениями могу стать: огонь печи, высокая температура аппарата, самовоспламенение, трение. Поэтому много внимания уделяется вопросам снижения коррозии, для чего в поток сырья вводят ингибиторы и нейтрализаторы, но это не снимет задачу выявления развития коррозии. Идентифицировать эту нештатную ситуацию невозможно без применения средств off-line диагностики, например, на основе методов неразрушающего контроля. Для on-line диагностики одним из методов может быть применение статистической диагностической модели.

Работа системы диагностики напрямую зависит от достоверности данных, поступающих из информационных измерительных систем. На НПЗ уже запускаются и эксплуатируются алгоритмы самодиагностики датчиков на предмет выявления отказов и сбоев [7], чаще всего в системах противопожарной защиты. Результаты срабатывания системы диагностики аккумулируются в архивах. Анализ собранных данных предусматривает обязательное участие экспертов.

Для реализации концептуальной схемы был проведен однотуровый опрос группы экспертов (технологов) по схеме метода «Дельфи». При этом учитывались специфики работы специалистов. Для дистанционного обмена информацией были сформированы опросные листы с первоначальным перечнем возможных нештатных ситуаций, составленным на базе эксплуатационной и отчетной документации. Как показали результаты обобщенного анализа собранных знаний наибольшая часть нештатных ситуаций связана с блоком колонны фракционирования К2. В этой работе в качестве примера на рис. 1 в виде дерева отказов показаны две нештатные ситуации, возникающие при эксплуатации печи Т-1А, связанные с ними симптомы и оборудование, с помощью которого можно их зафиксировать.

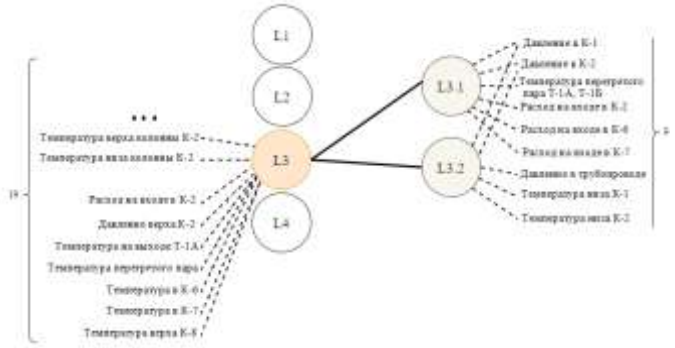


Рис. 3. Двухуровневая декомпозиция знаний для системы диагностики установки ЭЛОУ-АТ-6

Таким образом, опираясь на апробированные результаты разработок систем диагностики состояния установок первичной переработки нефти, выполнена декомпозиция базы знаний, которая включает 4 блока верхнего уровня, в каждом из которых группируются несколько описаний нештатных ситуаций. На рис. 3 в качестве примера показана связь нарушений блока 3 (колонны К2) и перечня диагностических показателей (19 для блоков верхнего уровня и 9 для примера описания нарушений блока L3), и раскрыто множество показателей для двух нештатных ситуаций, приведенных на рис. 1.

III. Структура иерархической нейросетевой диагностической модели

Отличительная особенность нефтеперерабатывающих технологических линий является многопараметричность, многосвязность, наличие рециклов и как следствие множество взаимосвязанных нештатных ситуаций, которые могут проявляться одновременно. Разработка математических моделей развития нарушений на установках первичной переработки нефти, которые в большинстве случаев нелинейны, затруднена, так как существующие описания в основном характеризуют регламентные режимы течения процесса. Учитывая это, предложено сформировать диагностическую модель на базе нейросетевых технологий. Преимущество нейронной сети, как базовой модели состоит в способности такой модели подстраиваться под изменения обучающего массива данных, который в ходе эксплуатации может модифицироваться и расширяться, что важно для непрерывно протекающего процесса [2, 8]. Ограничением применения такого вида моделей является жесткость структуры, в частности числа входов/выходов сети. Поэтому рациональным будет перенос на нейросетевую модель декомпозиционного разбиения знаний (рис. 3) и формирование для каждой укрупненной единицы знаний своей нейронной сети. Тогда каждая задача будет оформлена своей нейросетевой моделью (НСМ) и в случае ее расширения будет необходимо заменить в иерархической системе одну или две сети, не трогая всю структуру в целом [9].

Если применять такую структуру для решения задач диагностики, то первый уровень модели используется для определения нештатных ситуаций, а совокупность сетей второго уровня – для локализации причины возникновения нештатной ситуации. На рис. 4 приведена структура двухуровневой НСМ, на верхнем уровне которой располагается нейронная сеть SL с 19 входными параметрами $x_i^L(t)$, $i \in [1,19]$ и четырьмя выходами (L1, L2, L3, L4), каждый из которых инициализирует запуск соответствующей сети нижнего уровня. К каждому блоку L привязываются несколько сетей нижнего уровня, в которых группируются описания нарушений по технологическому принципу. Из нижнего уровня представлена сеть SP2 блока L3 с 9 входами $x_j^{P2}(t)$, $j \in [1,9]$ и 12 выходами P1-P12, каждый из которых привязан к текстовым сообщениях формулирующим описание нарушения.

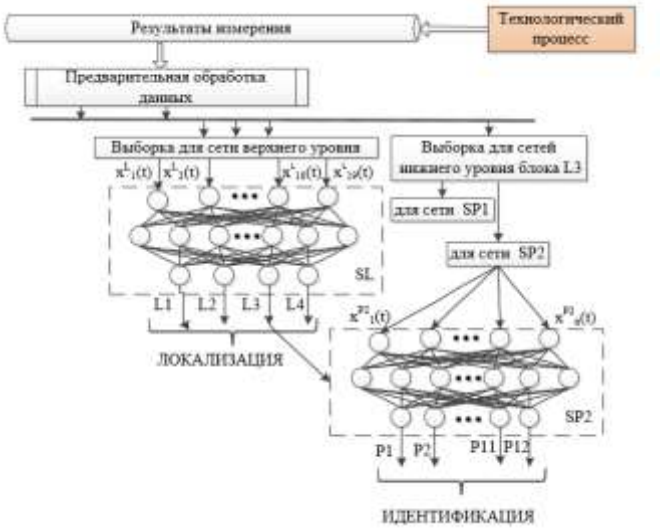


Рис. 4. Структура двухуровневой диагностической модели

Следующей задачей являлся выбор топологии сети. Анализируя примеры структур НСМ, на основе которых разрабатываются диагностические модели, можно сделать вывод, что в подавляющем большинстве это модели-классификаторы. Неплохие результаты работы в плане решения задач диагностики дает структура многослойной сети прямого распространения, обучающейся по схеме обратного распространения ошибки (backpropagation) (BPN) [10]. Разрешающая способность таких сетей достаточно высока и может подбираться под любой состав задачи благодаря широкому набору варьируемых параметров. Частным случаем сетей прямого распространения являются радиальные базисные сети (RBF), имеющие в качестве преимуществ возможность моделирования произвольной нелинейной функции с помощью только одного промежуточного слоя, что позволяет существенно сократить время обучения. Также для задач классификации хорошо зарекомендовали себя вероятностные сети, например, с топологией PNN, так как они более устойчивы к выбросам и проводят четкую кластеризацию по сравнению с сетями BPG и RBF, но дают больше ложных срабатываний в случаях появления неизвестных образов [11].

В структуре диагностической модели присутствует модуль предварительной обработки данных, выполняющий фильтрацию и нормирование, последняя операция необходима для устранения влияния переменных с большими значениями физических величин по сравнению с параметрами с малыми значениями.

Для данного процесса характерны два типа скрытых и монотонно нарастающих нарушений, связанных с коррозией и с разгерметизацией. Выявить такого рода нарушения, опираясь только на сравнение результатов измерения с порогами, не представляется возможным, поэтому в качестве возможного варианта решения предлагается использовать механизм сравнения с моделью процесса, выполненной на основе отдельной НСМ.

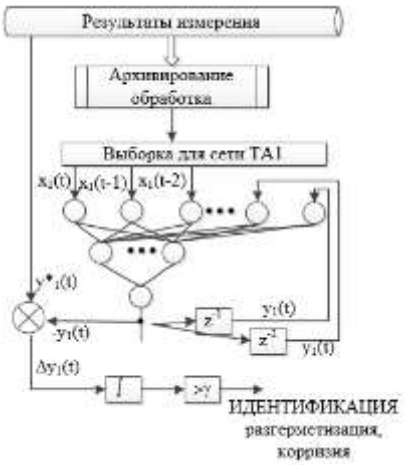


Рис. 5. Структура диагностической модели скрытых нарушений

По выборке данных за период работы установки, составляющий первую четверть межремонтного периода, строится нейросетевая модель процесса и в качестве опорного параметра выбирается температура и давление в аппарате. Выбор для этой цели реккурентной НСМ обусловлен необходимостью учета переходных процессов [11]. Ищется невязка $\Delta y(t)$ между результатами измерения технологического параметра $y^*(t)$ и результатом его моделирования $y(t)$. Интеграл невязки дает нарастание ошибки по этому параметру. Если накопленное значение ошибки превысит пороговое значение γ, то на данном участке технологической линии следует оценить состояние технологического оборудования с помощью средств off-line контроля.

IV. Анализ результатов имитационного моделирования

Для проверки работоспособности предлагаемой модели сформированы обучающая выборка данных и тестовый массив. В виду отсутствия статистических данных, содержащих динамику изменения диагностических показателей, при развитии всех рассматриваемых нарушений было использовано наложение линейных

характеристик для моделирования нештатных ситуаций. Обучающий массив для сети верхнего уровня включал 5 частей, одна из которых содержала информацию о нормальном ходе процесса, который дает опорную составляющую модели (LN). Сравнительный анализ результатов работы НСМ на базе BPG показал, что уже 3-х слойная сеть с числом нейронов на первом слое – 15 (функция гиперболический тангенс), на втором – 7 (сигмоидальная функция) и на выходном – 4 (линейная функция) дает четкое распознавание нарушений. Результаты имитационного моделирования развития нарушений в каждом из 4 блоков при использовании топологии НСМ-BPG приведены на рис. 6, а при использовании топологии PNN – на рис. 7.

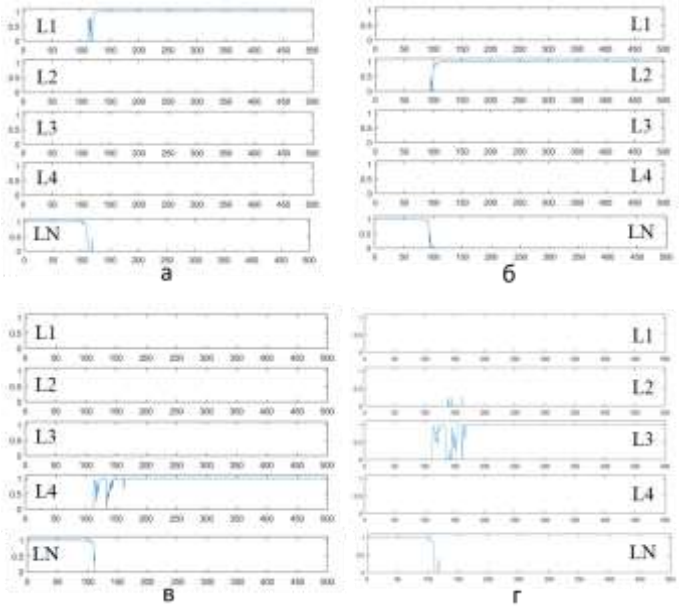


Рис. 6. Результаты тестирования сети BPG: а, б, в, г – при подаче на вход теста параметров ситуации из блока L1, L2, L3 и L4 соответственно

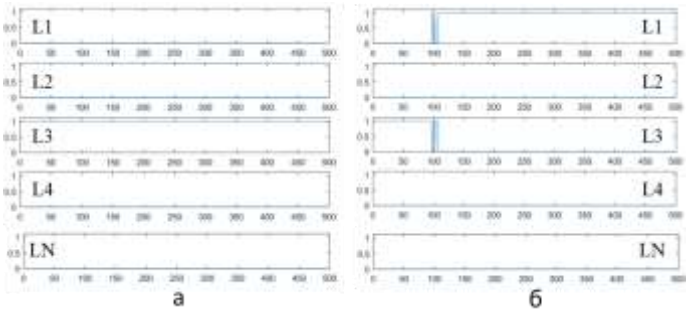


Рис. 7. Результаты тестирования сети PNN: а, б – при подаче на вход теста параметров ситуации из блока L3, L1 соответственно

Как видно из результатов тестирования НСМ на базе топологии PNN, диагностическая модель не всегда дает четкое распознавание нарушений, возникает путаница кластеров (на рис. 7*б* на первых 100 шагах расчета в нормальном режиме ложно идентифицировано нарушение в блоке L3), причем, когда тестируется нарушение блока L3, PNN сеть четко выявляет его. Таким образом, несмотря на указываемые ранее преимущества сети на основе топологии PNN, для рассматриваемого объекта целесообразно принять структуру на основе BPG сети.

V. Заключение

Разработка системы технологической диагностики является развитием ранее предложенного подхода мониторинга и диагностики на линиях первичной переработки нефти. Своевременное обнаружение коррозийного повреждения оборудования или монотонного отклонения в технологическом режиме, позволит сократить риск развития аварийных ситуаций техногенного характера на установке ЭЛОУ-АТ-6. В рамках данной работы предложена многоуровневая нейросетевая структура диагностической модели и продемонстрирована ее работоспособность на примере распознавания развития нарушения в ходе имитационного моделирования.

Список литературы

[1] ГАЗПРОМ Нефть. – Москва. – URL: https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2017-september/1165340/ (дата обращения 20.04.2020). №144. Текст: электронный.

[2] Горева Т.И. Нейросетевые модели диагностики технических систем / Т.И. Горева, Н.Н. Порнягин, Г.А. Пюкке // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2012. № 1(4). С. 31-43.

[3] Ермоленко А.Д. Проектирование систем автоматизации процессов нефтепереработки / А.Д. Ермоленко, Д.А. Калабин, М.А. Лебедской-Тамбиев, А.С. Макаров, В.Г. Харазов: учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург: Профессия, 2017. 272с.

[4] Ермоленко А.Д. Автоматизация процессов нефтепереработки / А.Д. Ермоленко, О.Н. Кашин, Н.В. Лисицын, А.С. Макаров, А.С. Фомин, В.Г. Харазов: учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург: Профессия, 2015. 304с.

[5] Лебедева М.И. Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Лебедева М.И., Богданов А.В., Колесников Ю.Ю. // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности. 2013. Вып. №4(50). С. 1-8.

[6] Лебедева М.И. Об оценке пожарного риска на технологической установке первичной переработке нефти/ М.И. Лебедева// Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности. 2013. Вып. №4(50). С. 1-8.

[7] Федоров А.В. Информационное обеспечение АСУ протовопожарной защиты технологическхи процессов переработки нефти / А.В. Федоров, М.И. Лебедева, Е.Н. Ломаев // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности. 2011. Вып. №4(5). С.1-7.

[8] Borairi M., Wang H. Actuator and sensor fault diagnosis of non – linear dynamic system via genetic neural networks and adaptive parameter estimation technique. // IEEE Press, 1998. pp. 278-282.

[9] Gomm J.B. Adaptive neural network approach to on-line learning for fault diagnosis. // Trans. Meas. Control 20, 1998. pp. 144-152.

[10] Y. Zhou, J. Hahn, M. Sam Mannan Fault detection and classification in chemical processes based on neural networks with feature extraction // ISA Transactions, 2003, v.42. p. 651-664.

[11] Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / 2-е изд., перев. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

ПИД-управление: современное представление

М. Д. Меркулов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
max.mer@list.ru

***Аннотация*. В статье описывается современное представление ПИД-регуляторов в системах автоматического управления. Рассматриваются виды автоматической настройки параметров регулятора. Описывается принцип настройки регулятора с использованием нечеткой логики. Описываются современные программные средства настройки ПИД-регуляторов.**

Ключевые слова: ПИД-регулятор; автоматическая настройка; адаптация; нечеткий регулятор; программные средства настройки регуляторов

ПИД-управление предполагает рассмотрение систем, процессы управления в которых осуществляются с использованием пропорционально-интегро-дифференцирующих регуляторов. ПИД-регуляторы широко распространены в технических системах управления. Они подкупают простотой понимания реализуемого закона регулирования. Однако существуют и проблемы, актуальные по сей день.

За долгую историю своего использования и развития ПИД-регулирование пополнилось множеством методов синтеза и различных нововведений, призванных повысить эффективность процессов регулирования.

I. Автоматическая настройка и адаптация регулятора

С развитием промышленной техники и программируемых логических контроллеров (ПЛК) появилась возможность внедрения методов, позволяющих снизить затраты человеческого труда на инсталляцию, настройку и обслуживание регуляторов. Многие методы автоматической настройки и адаптации ПИД-регуляторов, используемые в настоящее время, были разработаны еще в 60-х годах XX века [1], однако использоваться они стали только с середины 80-х. Виной тому сложность реализации адаптивных алгоритмов на элементной базе, которая существовала до появления микроконтроллеров [2].

Автонастройка параметров может выполняться полностью автоматически или по требованию человека. Инициатором автоматической настройки может выступать какое-либо заранее заданное условие (изменение нагрузки, внешнего воздействия и т. д.). Автоматическая настройка также носит название адаптация. Иногда термин «адаптация» трактуют более широко, как приспособление регулятора к реальному объекту на стадии ввода системы в эксплуатацию. [1]

Автоматическая настройка параметров включает в себя три принципиально важных этапа (рис. 1): идентификация, расчет параметров регулятора, настройка регулятора.

Отметим, что автоматическая настройка может и не включать в себя этап идентификации объекта. Такой способ подстройки называется поисковой (с идентификацией объекта – беспоисковой). Поисковая настройка базируется обычно на алгоритмах поиска минимума критериальной функции. То есть с использованием алгоритмов оптимального управления.

Рис. 1. Общая структура системы с автоматической настройкой

Наиболее распространен метод градиентного спуска: находят производные от критериальной функции по параметрам ПИД-регулятора, которые являются компонентами вектора градиента, а далее производится изменение параметров в соответствии с направлением градиента [2].

В качестве разновидности адаптации различают разомкнутое управление параметрами регулятора (табличная автонастройка) (рис. 2), когда заранее найденные параметры регулятора для разных условий работы системы заносятся в таблицу. При наступлении определенных условий параметры из таблицы извлекаются и устанавливаются в регулятор.

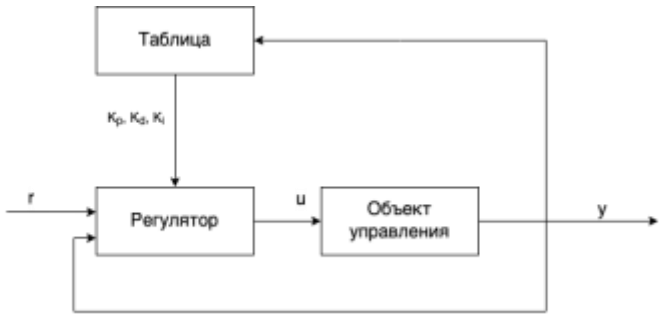


Рис. 2. Табличная автонастройка

Отметим, что построение контура адаптации не является «панацеей». Контроллер может не дать требуемого качества регулирования, по причинам, не зависящим от качества заложенного алгоритма адаптации. Сам объект управления может быть плохо спроектирован (большая задержка, высокий порядок объекта и т. д.). Неверное расположение датчиков или их плохой контакт с объектом, высокий уровень помех в канале измерения также могут служить причиной ошибочной адаптации контроллера. Кроме того, нужно учитывать износ механических элементов системы. Необходимо убедиться в отсутствии перечисленных и других подобных проблем перед тем, как начинать автоматическую настройку.

II. Нечеткий адаптивный ПИД-регулятор

Увеличение интереса к технологиям искусственного интеллекта в системах управления привело к тому, что все чаще стали находить применение нечетки алгоритмы управления. Технология синтеза нечетких алгоритмов управления позволяет проводить оптимизацию контуров регулирования, не прибегая к сложным математическим исследованиям.

Подстройка регулятора производится с использованием блока нечеткой логики, который использует заранее сформированную базу правил и методы нечеткого вывода. Процесс автонастройки начинается с отыскания начальных приближенный коэффициентов регулятора. Обычно для этого используют метод Зиглера–Никольса. Далее определяют диапазоны выходных и выходных сигналов блока автонастройки, форму функций принадлежности искомых параметров, правила нечеткого вывода, механизм логического вывода, метод дефазификации и диапазоны масштабных множителей, необходимых для пересчета четких переменных в нечеткие. Фази-подстройка позволяет уменьшить перерегулирование, снизить время установления и повысить робастность ПИД-регулятора. [3]

Следует отметить, что в случаях, когда информации достаточно для получения точной математической модели объекта, традиционный регулятор всегда будет лучше нечеткого потому, что при синтезе нечеткого регулятора исходные данные заданы приближенно.

III. Программные средства настройки ПИД-регуляторов

В настоящее время существует около полусотни коммерческих продуктов для настройки ПИД-регуляторов [4]. Чаще всего система настройки ПИД-регулятора состоит из программного обеспечения под Windows, комплекта модулей ввода-вывода и соединительных кабелей. Такой объект включается в контур регулирования, система настраивается, полученные коэффициенты записываются в ПИД-контроллер. Связь с оборудованием осуществляется с применением OPC-сервера, DDE-, COM- или DCOM-технологий.

Развитие данной области направленно на расширение списка поддерживаемых ПИД-регуляторов, использовании методов искусственного интеллекта и методов диагностики. Кроме того, программные средства позволяют не только произвести настройку коэффициентов, но и провести полный анализ системы управления. Также возможно моделирование процессов регулирования, с последующим построением графиков во временной и частотной области, до ввода найденных параметров в память ПИД-регулятора

Благодаря удобному пользовательскому интерфейсу, большой производительности компьютера применение программных средств настройки позволяет получить параметры близки к оптимальным.

Регуляторы, реализующие пропорционально-интегро-дифференцирующий закон управления, остаются самыми популярными в промышленных системах управления в наше время. Несмотря на простоту самого закона регулирования, все еще актуальна проблема подбора коэффициентов регулятора, обеспечивающих процесс управления, отвечающий заранее заданным критериям качества. Отсутствие универсального способа установки коэффициентов ПИД-регулятора продолжает оставаться основным «двигателем» изучения и разработки все новых и новых методов синтеза и форм регуляторов.

Список литературы

[1] Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

[2] Лившиц М.Л., Шишялковский Б.И. Лакокрасочные материалы: Справ. пособие. 2-е изд. СПб.: Химия, 1996. 264 с.

[3] Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. 2008. №1. С. 86-95.

[4] Yesil E.; Guzelkaya M.; Eksin I. Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of pid controllers // World Automation Congress, 2004. Proceedings. Vol. 17, 28 June - 1 July 2004, p. 501-506.

[5] Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // IEEE Control System Magazine. Feb. 2006. P.42-25.

Исследование влияния инерционных свойств виртуального синхронного генератора на устойчивость системы

Р. М. Мигранов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
rmmigranov@stud.eltech.ru

Н. А. Доброскок
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
nadobroskok@etu.ru

***Аннотация*. За последние годы число используемых в системах генерации электрической энергии альтернативных источников энергии (АИЭ) резко возросло. Это привело к необходимости синтеза и исследования систем параллельно работающих АИЭ и основных источников питания, преимущественно, дизельных генераторных установок (ДСГ), применяемых как в централизованной системе, так и в системе малой распределенной энергетики (МРЭ). Для подключения АИЭ к общей шине переменного тока или сети используются инверторы. При этом в сегменте малых мощностей наиболее широко применяется трехфазная мостовая схема автономного инвертора напряжения (ТМАИН). В данной работе будет рассмотрен метод имитации таким инвертором инерционных свойств генератора, получивший название метода виртуального синхронного генератора (ВСГ) и обеспечивающий продолжительную устойчивую работу разнородных источников с существенно разными динамическими свойствами. Основное внимание будет уделено предварительной синхронизации и дальнейшему распределению мощности между источниками питания при изменении параметров системы ВСГ, отвечающие за его динамические свойства, а именно, виртуальный момент инерции и виртуальный коэффициент амплитуды.**

Ключевые слова: альтернативный источник энергии, система малой распределенной энергетики, метод виртуального синхронного генератора, трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения, синхронный генератор, синхронизация, предсинхронизация, распределение мощности, виртуальный момент инерции

I. Метод виртуального синхронного генератора

Рассматриваемый метод основывается на имитации инвертором статических и динамических свойств генератора, а именно на уравнении его механической части [1].

$$J_{\text{ДСГ}} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{мех}} - M_{\text{элм}} - M_{\text{демп}} \qquad (1)$$

где $M_{\text{мех}}$, $M_{\text{элм}}$, $M_{\text{демп}}$ – механический, электромагнитный и демпфирующий моменты генератора, $J_{\text{ДСГ}}$ – момент инерции ДСГ, ω – скорость вращения ротора.

Поскольку в инверторе нет механических перемещений, а уравнение (1) записано лишь по аналогии с ДСГ, то правую часть (1) необходимо переписать через мощности и перейти в операторную область [2, 3, 4]:

$$(J_{\text{ДСГ}} \cdot \omega_{\text{н}} \cdot s) \cdot \omega = P_{\text{мех}} - P_{\text{элм}} - P_{\text{демп}}$$

где $P_{\text{мех}} = P_{\text{жел}} - K_{\text{м}}(s) \cdot (\omega_{\text{н}} - \omega)$, $P_{\text{элм}}, P_{\text{демп}} = K_{\text{д}}(s) \cdot (\omega_{\text{н}} - \omega)$ – механический, электромагнитный и демпфирующий мощности генератора, $K_{\text{м}}(s)$ и $K_{\text{д}}(s)$ – регуляторы, $P_{\text{жел}}$ – задающее желаемое значение активной мощности, $\omega_{\text{н}}$ – номинальное значение угловой скорости вращения ротора.

В итоге уравнение, описывающее частоту выходного напряжения ТМАИН представляется в следующем виде:

$$(J_{\text{ВСГ}} \cdot s) \cdot \omega = P_{\text{мех}} - P_{\text{элм}} - K_{\omega}(s) \cdot (\omega_{\text{н}} - \omega) \qquad (2)$$

где $J_{\text{ВСГ}} = J_{\text{ДСГ}} \cdot \omega_{\text{н}}$ – виртуальный момент инерции ТМАИН, $K_{\omega}(s)$ – результирующий демпфирующий регулятор от частоты.

Для упрощения (2) произведем замену $\Delta\omega = (\omega_{\text{н}} - \omega)$, тогда:

$$(J_{\text{ВСГ}} \cdot s) \cdot \Delta\omega = P_{\text{мех}} - P_{\text{элм}} - K_{\omega}(s) \cdot \Delta\omega \qquad (3)$$

Аналогичным образом приведем уравнения, описывающие амплитуду выходного напряжения инвертора [3, 4].

$$K \cdot \frac{dU}{dt} = Q_{\text{мех}} - Q_{\text{элм}} - K_{U}(s) \cdot (U_{\text{н}} - U)$$

где $Q_{\text{жел}}$, $Q_{\text{элм}}$ – задающее желаемое и электромагнитный значения реактивной мощности, $U_{\text{н}}$ и U – номинальное и измеренное значения амплитуды выходного напряжения, $K_{U}(s)$ – результирующий демпфирующий регулятор от амплитуды, K – виртуальный коэффициент.

Также произведем замену и перейдем в операторную область:

$$(K \cdot s) \cdot \Delta U = Q_{\text{мех}} - Q_{\text{элм}} - K_U(s) \cdot \Delta U \qquad (4)$$

По уравнениям (3) и (4), описывающих амплитуду и фазу выходного напряжения инвертора, построим структурную схему системы управления ТМАИН, представленную на рисунке 1, в которой в качестве регулятора был выбран ПИ-регулятор.

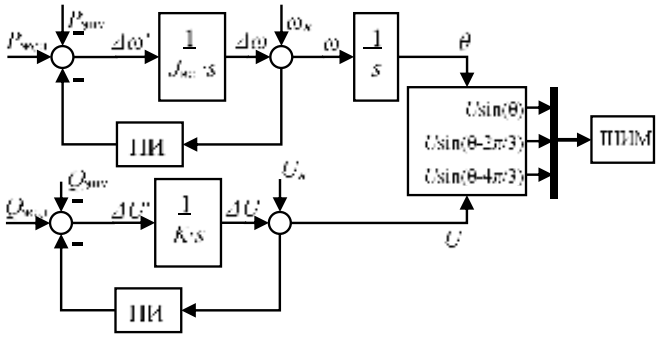


Рис. 1. Структурная схема система управления методом ВСГ

В рассматриваемой системе необходимо провести экспериментальный расчет параметров регуляторов: пропорциональная и интегрирующая составляющие и виртуальных коэффициентов: $J_{\text{всг}}$ и K. Последние два вычисляются согласно [4, 5] по следующим формулам:

$$J_{\text{ВСГ}} = \frac{P_{\text{СГ}}}{P_{\text{ВСГ}}} \cdot J_{\text{СГ}}$$
$$K \le \frac{5 \cdot D}{\omega_{\text{н}}} \qquad (5)$$

где $P_{\text{ДСГ}}$, $P_{\text{ВСГ}}$ – полные мощности генератора и инвертора, D – значение пропорциональной составляющей демпфирующего коэффициента от амплитуды.

По характеристикам P-ω и Q-U генератора определяются значения пропорциональных составляющих демпфирующих регуляторов, значения которых будут зависеть от диапазона изменения выходной мощности инвертора, следовательно, при выбранном подходе единственным параметром, определяемым эмпирически, является интегрирующая составляющая регуляторов.

II. Моделирование процессов синхронизации ДСГ и ТМАИН в программе MATLAB & SIMULINK

В данной части работы рассмотрим процессы в системе при оптимальных настройках и проанализируем изменения свойств системы управления при варьировании значений $J_{\text{всг}}$ и K.

A. *Настройка и моделирование системы при оптимальных параметрах*

Исследуемая система МРЭ состоит из основного источника питания, ДСГ, номинальной мощностью 85 кВт и действующим напряжением в 400 В и подключающийся к нему через ТМАИН источник постоянного тока в 800 В. Выходное напряжение инвертора сглаживается каскадным LC фильтром. Оба устройства работают на общую активно-индуктивную нагрузку, потребляющую 30 кВАР и 40 кВт соответствующих мощностей. Модель системы приведена на рис. 2, а ее параметры в табл. 1.

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ

Параметр	*Значение*	*Параметр*	*Значение*
$P_{\text{жел}}$	40 кВт	$Q_{\text{жел}}$	30 кВАР
$J_{\text{ВСГ}}$	0.6296	K	113
$\omega_{\text{н}}$	314 рад/с	$U_{\text{н}}$	326.6 В
D_{ω}	80425	D_U	7133
I_{ω}	25000	I_U	25000

На рис. 2 также представлены 4 подсистемы:

- измерения активной и реактивной составляющих мощностей ТМАИН и СГ;
- измерения частоты, фазы и амплитуды выходных напряжений ТМАИН и СГ;
- проверки условий синхронизации, а именно совпадение частоты, фазы и амплитуды выходных напряжений и формирование сигнала синхронизации;
- Системы управления, построенная по структурной схеме, изображенная на рис. 1 и блок формирования ШИМ (управляющего) сигнала.

B. *Изменение величины виртуального момента инерции*

Одним из главных параметров характеризующий свойства ВСГ является виртуальный момент инерции. На рис. 3 приведены диаграммы активной и реактивной составляющей мощности ТМАИН при изменении величины $J_{\text{всг}}$ от рассчитанного оптимального значения по (5). При уменьшении его значения возрастает быстродействие системы, но вместе с ней и колебательность, которая особенно влияет на устойчивость системы. При неполной загруженности инвертора и при слишком малых значениях система может стать неустойчивой. Колебательность также возрастает и при увеличении виртуального момента инерции, т. к. система стала более инерционной и перестала успевать отрабатывать изменения задающего воздействия.

C. *Изменение величины виртуального коэффициента амплитуды*

На рис. 4 приведена диаграмма реактивной мощности ТМАИН при изменении значения K от рассчитанного

оптимального значения по формуле (5). Как видно из рисунка, при повышении K наблюдается уменьшение быстродействия и увеличение времени регулирования, а при уменьшении наоборот, улучшились оба параметра переходного процесса: время регулирования и перерегулирование.

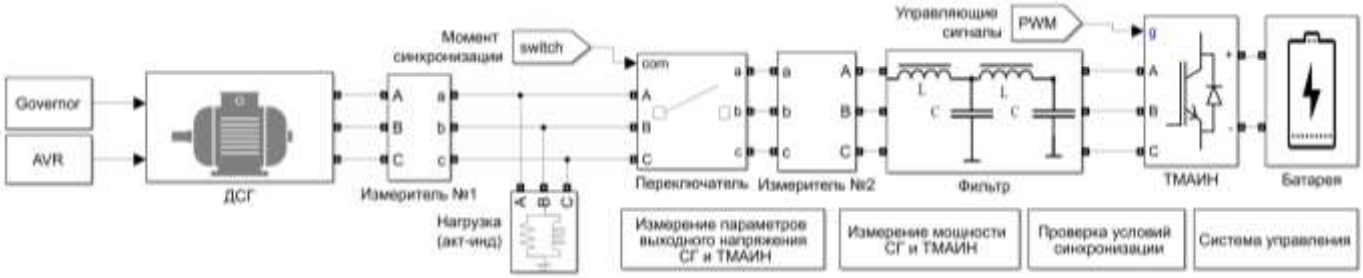


Рис. 2. Модель исследуемой системы МРЭ

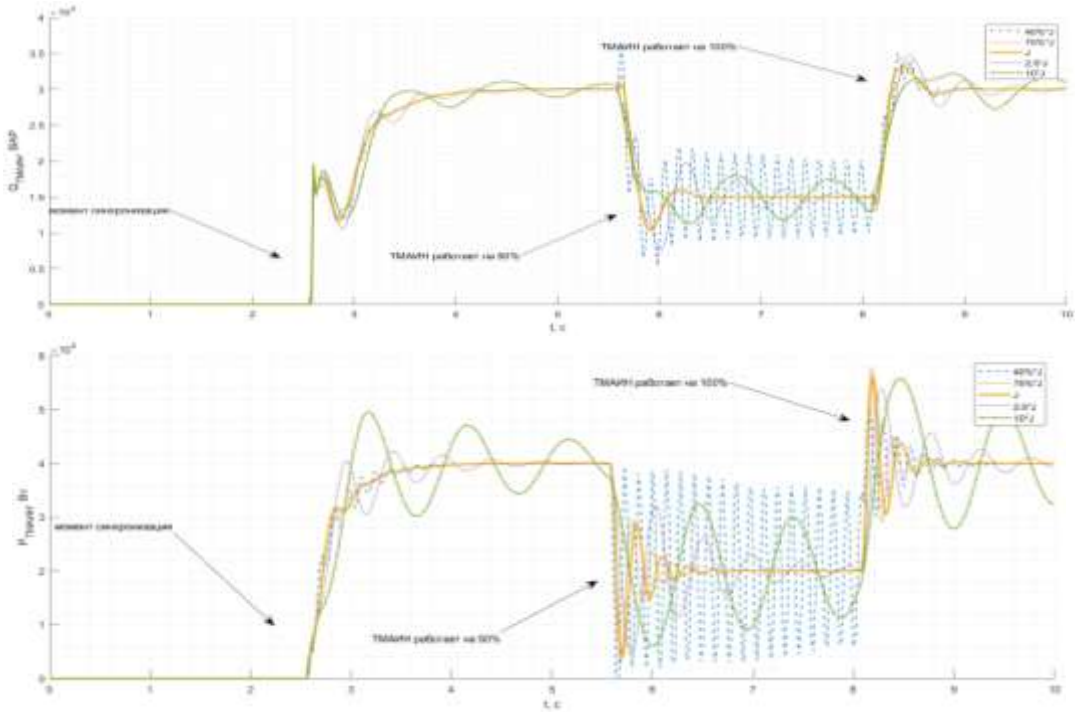


Рис. 3. Графики реактивной и активной мощностей ТМАИН при изменении виртуального момента инерции

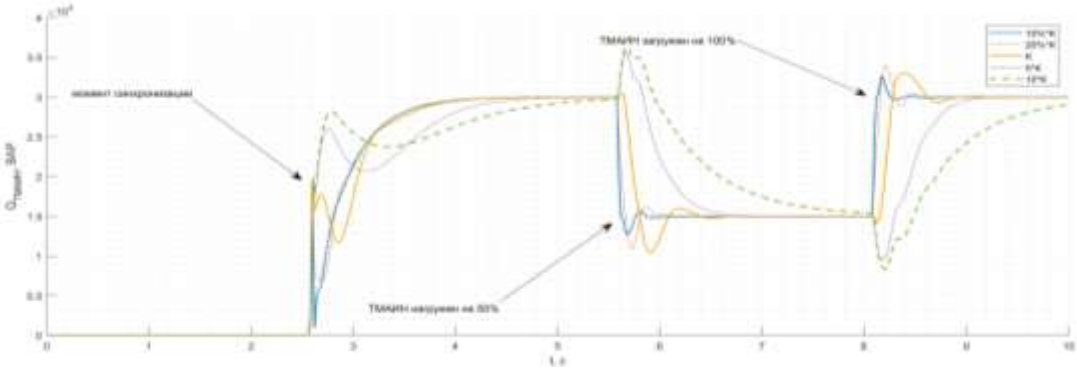


Рис. 4. График реактивной мощности ТМАИН при изменении виртуального коэффициента амплитуды

III. Заключение

В результате исследования метода ВСГ на компьютерной модели системы МРЭ параллельно работающих ДСГ и источника постоянного тока, подключенных к шине общего питания посредством ТМАИН были получены диаграммы активной и реактивной составляющих мощности ТМАИН после синхронизации, при нагрузке инвертора в 50 и 100 % от номинальных значений, по которым проведен анализ влияния виртуальных параметров ВСГ, таких как, виртуальный момент инерции и виртуальный коэффициент амплитуды на переходные процессы и устойчивость системы.

Показано, что при уменьшении виртуального момента инерции резко возрастала колебательность системы и при меньших нагрузках от номинального система приходит к неустойчивому состоянию, колебательность также возрастает и при увеличении момента инерции из-за уменьшения скорости реакции системы на изменяющееся воздействие. Следовательно, рассчитанная величина виртуального момента инерции лежит в области оптимальных значений.

В меньшей степени на устойчивость системы влияет виртуальный коэффициент амплитуды. Его уменьшение приводит к возрастанию быстродействия системы, а увеличение, наоборот, к уменьшению. Влияние коэффициента существенно только для расчета реактивной мощности ТМАИН.

Дальнейшее изучение проблемы сводиться к приведению аналитического подхода к анализу устойчивость системы при изменении основных параметров ВСГ.

Благодарность

Выражаем благодарность ассистенту кафедры САУ Г. В. Бельскому за содействие в организации расчетов с применением современных программно-аппаратных средств.

Список литературы

[1] Судовая электротехника и электроника: учебник / Архангельский Е.Н., Богач В.Г., Вилесов Д.В., Сеньков А.П. / под ред. д-ра техн. наук Д.В. Вилесова. Л.: Судостроение, 1985. 312 с.

[2] Migranov R.M. Inverter Power Generation Control in Microgrid: Bachelor's thesis - ETU “LETI”, 2021, 79 p. URL: https://nauchkor.ru/pubs/upravlenie-invertornoy-generatsiey-energii-v-sisteme-maloy-raspredelennoy-energetiki-60eacc83e4dde500016d320b

[3] Chen, Xuhai & Zhang, Yiwang & Dong, Jiqing & Mao, Xingkui & Chen, Jiaqiao & Wen, Buyin & Zhang, Zhe. (2020). A Novel Pre-Synchronization Control for Grid Connection of Virtual Synchronous Generator. Elektronika ir Elektrotechnika. 26. 25-31. 10.5755/j01.eie.26.6.25874.

[4] K. Shi, W. Song, H. Ge, P. Xu, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Transient Analysis of Microgrids With Parallel Synchronous Generators and Virtual Synchronous Generators," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 1, pp. 95-105, March 2020, doi: 10.1109/TEC.2019.2943888.

[5] Hao, Yue & Li, Hua. (2020). Research on VSG Control Strategy of Microgrid. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 440. 032087. 10.1088/1755-1315/440/3/032087.

Сравнительный анализ архитектур сверточных нейронных сетей

Е. А. Новиков
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
egoredmc@gmail.com

***Аннотация*. В статье рассматривается развитие некоторых архитектур сверточных нейронных сетей с точки зрения такой теоретической характеристики как размерность Вапника–Червоненкиса (VC-размерность). В частности, в статье рассматриваются такие сети как AlexNet и GoogLeNet, для которых производится сравнение их VC-размерностей, сравнение качества их работы и определяется взаимосвязь между качеством работы и VC-размерностью нейронной сети.**

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, сверточная нейронная сеть, статистическая теория обучения, VC-размерность, размерность Вапника–Червоненкиса, комбинаторная размерность

За последние несколько десятков лет нейронные сети получили активнейшее развитие, стали одним из самых перспективных направлений искусственного интеллекта, а сейчас всё больше и больше внедряются в крупные коммерческие проекты. Одним из самых используемых типов нейронных сетей являются сверточные нейронные сети, которые чаще всего применяются для распознавания и классификации изображений.

Известно, что каждый год проводится соревнование ImageNet (ILSVRC), на котором различные нейронные сети соревнуются в распознавании и классификации. В недавнем исследовании [1] проводится анализ лучших нейронных сетей за несколько лет, которые участвовали в этом соревновании (рис. 1).

В данной работе мы постараемся сравнить результаты вышеупомянутого анализа с теоретическими возможностями этих сетей. Для этого рассмотрим комбинаторную размерность некоторых нейронных сетей и сопоставим её с результатами, которые данные нейронные сети продемонстрировали. В частности, для теоретического анализа выберем следующие нейронные сети: LeNet-5 [4], AlexNet [5] и GoogLeNet [6]. Отметим, что хоть сеть LeNet-5 и не участвовала в соревновании (а потому не показана на рисунке 1), однако она является первой сверточной сетью, из-за чего сравнение с ней позволяет увидеть развитие за полтора десятка лет.

Как уже отмечалось, в качестве теоретической характеристики нейронных сетей будет использоваться комбинаторная размерность. Как известно, комбинаторная размерность (она же VC-размерность или размерность Вапника–Червоненкиса) – характеристика множества функций, по которому происходит оптимизация, описывающая количество различных возможных вариантов оптимизации. Таким образом, комбинаторная размерность нейронной сети описывает её потенциальную возможность приближения к желаемой целевой функции.

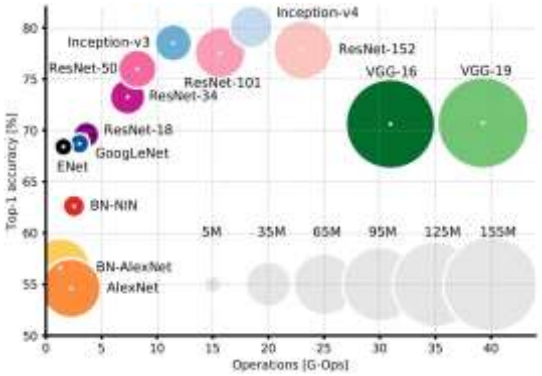


Рис. 1. Сравнение характеристик нейронных сетей [1]. По оси x – количество операций, необходимых для прохода сигнала по сети от входа до выхода (в миллиардах операций); по оси y – наибольшая точность сети; размер кружка соответствует числу параметров сети

Подсчет комбинаторной размерности для нейронных сетей представляет собой отдельную (нетривиальную) задачу теории статистического обучения. Для данной работы достаточно будет оценки комбинаторной размерности для нейронных сетей с сигмоидальной функцией активации [2] и с полиномиальной функцией активации (в нашем случае, это ReLU) [3].

Прежде всего, рассмотрим нейронную сеть LeNet-5 [4]. Данная сверточная нейронная сеть использует сигмоидальную функцию активации внутренних слоев; используя данные из исходной статьи (число весов = $60*10^3$, число нейронов = 1670, число слоев = 7), получим размерность $\text{VC-Dim}(F_{\text{LeNet-5}}) \leq 5.02*10^{15}$.

Однако здесь стоит оговориться о полученном значении: поскольку данное ограничение является ограничением сверху, то размерность нейронной сети может являться значительно меньшей. Кроме того, в связи со сложность анализа сигмоидальных нейронных сетей, на текущий момент наилучшие оценки размерности таких сетей имеют асимптотику $O(w^2k^2)$, где w – число весов сети, а k – число нейронов (мест применения активационной функции). А учитывая, что оценка размерности полиномиальных нейронных сетей имеет асимптотику O(wlog(wk)), то приведенная оценка не может быть использована для сравнения. По этой причине,

мы будем считать, что возможности сигмоидальных функций активации примерно соответствуют возможностям полиномиальных (а практика показывает, что функция ReLU позволяет добиваться лучших результатов, чем сигмоидальные функции), в связи с чем будем условно (иначе говоря, необоснованно) оценивать LeNet-5 используя оценку для нейронных сетей с полиномиальной функцией активации. Такая условная комбинаторная размерность будет оцениваться как $VC\text{-}Dim`(F_{LeNet\text{-}5}) \leq 32.62*10^6$. Данная оценка, строго говоря, может оказаться ошибочной, однако в большей части практических ситуаций она будет верной.

Далее, рассмотрим нейронную сеть AlexNet [5]. Данная сеть имеет функцию активации ReLU, следовательно, используя данные из статьи (число весов = $60*10^6$, число нейронов = $650*10^3$, число слоев = 8), получим $VC\text{-}Dim(F_{AlexNet}) \leq 5.62*10^{10}$.

Наконец, рассмотрим нейронную сеть GoogLeNet [6]. Аналогично предыдущей сети, рассматриваемая сеть использует ReLU в качестве функции активации. Используя данные из статьи (число весов = $1.5*10^9$, число нейронов = $6.8*10^6$, число слоев = 27), получим $VC\text{-}Dim(F_{GoogLeNet}) \leq 7.09*10^{12}$.

Сопоставляя полученные значения комбинаторной размерности с данными о качестве работы нейронных сетей (таблица I), можно увидеть, что рост размерности нейронных сетей измеряется порядками, что позволяет значительно увеличивать качество работы нейронных сетей.

ТАБЛИЦА I СРАВНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Сверточная нейронная сеть	**Характеристики**		
	VC-Dim(F)	***Точность***	***Число операций***
LeNet-5	$32.62*10^6$	N/A	N/A
AlexNet	$5.62*10^{10}$	54%	$2.5*10^3$
GoogLeNet	$7.09*10^{12}$	68%	$3.5*10^3$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Canziani A., Culurciello E., Paszke A. An Analysis of Deep Neural Network Models for Practical Applications // ArXiv. 2016. №abs/1605.07678.

[2] Karpinski M., Macityre A. Polunomial Bounds for VC Dimension of Sigmoidal Neural Networks// Electron. Colloquium Comput. Complex. 1995. №1.

[3] Bartlett P.L., Maiorov V., Meir R. Almoust Linear VC-Dimension Bounds for Piecewise Polynomial Networks // Neural Computation. 1998. №10. С. 2159-2173.

[4] LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Halffner P. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. 1998.

[5] Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2012. N 25.

[6] Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S. Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. Going deeper with convolutions // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. С. 1-9.

Анализ алгоритмов оптимизации для планирования движения и проектирования управления двуногими роботами

Д. В. Огурецкий
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
dvogureckiy99@gmail.com

***Аннотация*. В статье представлен краткий обзор алгоритмов на основе оптимизации, применяемых для планирования передвижения и проектирования управления для двуногих роботов. Описываются места применения выпуклой, смешанно-целочисленной и разреженной нелинейной оптимизации для решения различных задач, от постановки ступенек до планирования и контроля всего тела.**

Ключевые слова: гуманоид; оптимизация; передвижение на ногах; оптимизация траектории; планирование движения; стабилизирующий контроллер; смешанно-целочисленная выпуклая оптимизация; LQR

I. Введение

Шагающая робототехника необходима для обеспечения надежного, универсального и динамичного передвижения. Существуют ситуации, когда нам требуется создать полную кинематику робота, например, сценарии бедствий, когда у нас есть сложные среды, которые могут состоять из:

- неровного рельефа,
- различных препятствий: ступенек, зазоров, мусора и т. д.

В таких соревнованиях, как DARPA Robotics Challage (DRC) и др. можно встретить такие задачи:

- ходьба на открытом воздухе по пересеченной местности,
- поддержание устойчивости при приложении сил к окружающей среде,
- задачи, требующие динамических движений всего тела:
    - вылезание из машины,
    - поднятие с земли.

На пути решения этих задач возникают следующие препятствия, такие как:

- трудности с управлением сложностью модели робота и окружающей среды для эффективного онлайн-планирования и контроля обратной связи. Потому что в некоторых случаях нужны более наглядные кинематические и динамические модели, чем в других,
- достижение достаточно точного исполнения движений с учетом неизбежных ограничений датчиков,
- поддержание роботом крайне малого отклонения от заданной траектории шагов.

Задачи по ходьбе и балансировке можно предварительно классифицировать на следующие:

- типичная походка (или обычная ходьба) по ровной поверхности,
- движения всего тела (динамическая ходьба), такие как бег или подъем с земли, хватание за поручни, переход из положения лежа в положение стоя,
- выполнение манипуляций, таких как ходьба с не моделируемыми грузами,
- перемещение по неровной местности, например, по шлакобетонному покрытию,
- подъем по лестнице с частичным контактом ступней,
- балансировка на одной ноге.

Выделяются два подхода к планированию движений:

- планирование движений: для типичной походки можно комбинировать эти компоненты для вычисления желаемых траекторий ходьбы:
    - эффективный планировщик шагов,
    - простая динамическая модель робота.
- динамическое планирование движений: для планирования движений требуются более сложные, динамические движения всего тела, более описательная кинематика и динамические модели.

Для управления (стабилизации траекторий) может использоваться нестационарный линейно-квадратичный регулятор (LQR) [1].

II. Планирование движения

Планирование движения для шагающих роботов - это принципиально смешанная задача оптимизации:

- дискретная оптимизация

Данная задача оптимизации используется для определения того, где и когда контакты с окружающей средой инициируются или прерываются.

- непрерывная оптимизация

Данная задача оптимизации используется во время непрерывного контакта с поверхностью, во время которого система обычно должна двигаться плавно, в то время как система в целом:

- поддерживает баланс,
- достигает желаемого движения,
- взаимодействуют с окружающей средой.

Для типичных задач ходьбы (которые были описаны ранее) дискретная фаза раскладывается на две фазы:

- анализ окружающей среды и вычисление набора выпуклых областей, где контакты допустимы,
- назначение контактов этим областям таким образом, чтобы минимизировать затраты при соблюдении кинематических и динамических ограничений.

Для второй фазы есть два разных подхода:

- планирование движения: кинематические ограничения на позы шагов определяются относительно предыдущего шага с использованием приблизительных достижимых областей,
- динамическое планирование движения: включение полной кинематики и центроидальной динамики в оптимизацию. Этот подход идет на один шаг дальше, поскольку он позволяет гарантировать и поддерживать более широкий спектр движений и взаимодействий с окружающей средой, но за счет увеличения времени вычислений.

В этой работе эти два подхода были объединены вместе таким образом, что первый подход мог стать ценным набором выпуклых ограничений для дальнейшей нелинейной оптимизации [1].

A. Выпуклое разложение

Вычисление набора выпуклых областей включает несколько шагов:

- Первый шаг — исключить участки местности с крутизной, превышающей установленный порог, чтобы каждая шаг мог бы лежать только в множестве безопасных поверхностей.
- Если существует невыпуклый и несвязный набор, то комбинаторные аспекты размещения шагов могут быть достигнуты путем разложения невыпуклого набора множества безопасных поверхностей на набор выпуклых плоских безопасных областей.
- Ограничение оптимизации целевой функцией позволяет легко избавиться от экспоненциального роста числа возможных назначений шагов выпуклым областям, которые могут быть настолько большими, что могут показаться неразрешимыми.

B. Планирование шагов как задача смешанно-целочисленной выпуклой оптимизации

Задача планирования шагов - это выбор расположения шагов на заданной местности от начального состояния до цели, при этом гарантируется, что последовательность шагов может быть безопасно выполнена роботом.

Этот подход к вычислению желаемых траекторий ходьбы можно разложить на:

- Лидар идентифицирует препятствия и некоторые параметры рельефа путем сканирования области вокруг робота и создания карты препятствий (Octomap).
- Затем решается несколько задач оптимизации, чтобы найти возможную последовательность шагов через полученную ранее карту препятствий.
- Наконец, на этих этапах вычисляется желаемый центр траектории давления, который затем вводится в контроллер.

Эта проблема представляется как однократная смешанно-целочисленная выпуклая оптимизация относительно некоторой целевой функции, при этом гарантируется, что каждый шаг находится на безопасной поверхности, со следующими оптимизируемыми величинами:

- количество шагов
- их положение и ориентация

Существующие методы планирования шагов, в общем, делятся на три категории:

- дискретный поиск,
- непрерывная оптимизация,
- смешанно-целочисленная выпуклая оптимизации выполняет одновременную оптимизацию дискретного назначения шагов выпуклым областям и непрерывного положения шагов в этих областях.

Дискретные подходы к поиску обычно используют набор «приёмников», т.е. список возможных поз для одной ступни относительно положения другой ступни. Из набора «приёмников» можно построить дерево возможных планов шагов и изучить его, чтобы найти путь от начала до цели. Избегать препятствий легко, обрезая ветви дерева всякий раз, когда ступня пересекает препятствие. Выполнение этих дискретных поисков требует очень тщательного выбора набора «приёмников»: маленький набор строго ограничивает возможные движения, в то время как

большой набор приводит к быстро ветвящемуся дереву возможных планов шагов. Методы дискретного поиска, такие как A^*, могут быть сложными для применения при планировании шагов из-за сложности поиска информативной допустимой эвристики.

Непрерывная оптимизация позволяет избежать вызовов, связанных с выбором конкретного набора «приёмников», путём изменения положение каждого шага с учетом некоторых ограничений. Таким образом, достижимость положений шагов ногами робота представляется в виде ограничений на относительное положение каждого шага. Могут быть добавлены затраты или ограничения, чтобы гарантировать, что план шагов достигнет своей целевой позиции. Однако необходимость в выпуклых ограничениях не позволяет этой оптимизации учитывать рыскание робота или его ног и не позволяет ему справляться с уклонением от препятствий. Хотя существует невыпуклая оптимизация для поиска локально оптимальных планов шагов, где можно было включить рыскание в качестве переменной решения, но она по-прежнему не позволяет эффективно избегать препятствий.

Общая форма смешано-целочисленного выпуклого программирования:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x},\mathbf{y}} \quad & f(\mathbf{x},\mathbf{y}) \\ \text{с учётом} \quad & \mathbf{g}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \le 0 \\ & y \in \mathbb{Z}^m, \end{aligned}$$

где f и g – выпуклые функции, а элементы вектора y принимают целочисленное значение.

C. Динамическое планирование движений (динамическое планирование движения всего тела)

Для выполнения динамического планирования движения кинематические и динамические ограничения часто появляются вместе. Например, робот, спрыгивающий с уступа, должен рассуждать о следующем:

- контактные силы, прикладываемые во время отрыва, скорость центра масс робота (COM) в точке взлета,
- положение ступней относительно уступа во время полета,
- кинематическая достижимость ног при приземлении.

Алгоритмы оптимизации траектории делятся на два основных класса:

- «shooting» методы: включают в себя только управляющие сигналы в качестве оптимизируемых переменных и должны напрямую моделировать систему, чтобы оценить функцию стоимости.
- «transcription» методы: с другой стороны, включают конечный набор состояний вдоль траектории в качестве оптимизируемых переменных и динамику системы в качестве ограничений на состояние и входных переменных.

III. Управление

Стабилизирующие свойства LQR используются путем комбинирования оптимальных затрат на выполнение LQR внутри квадратичной программы (QP) с такими ограничениями, связанными со всем роботом:

- упрощенная динамическая модель,
- контактные ограничения,
- входные сигналы в вычислительную программу команд для силовой части сервоприводов.

Управление на основе QP обеспечивает универсальность: движения всего тела можно отслеживать или ограничивать различными способами.

Входные данные для контроллера вычисляются устройством оценки состояния с малым отклонением, которое объединяет кинематическую, инерциальную информацию и информацию с лидара [1].

IV. Среды моделирования

Существует несколько сред для моделирования, в которых можно смоделировать управление роботом. Приведу те, в которых есть робот Atlas:

- PyDrake toolkit

Это набор инструментов для анализа динамики роботов и разработке систем управления для них, с упором на проектирование / анализ на основе оптимизации.

Библиотека стремится моделировать даже очень сложную динамику роботов (например, включая трение, контакт, аэродинамику и т. д.). Но всегда с акцентом на раскрытие структуры в управляющих уравнениях (разреженность, аналитические градиенты, полиномиальная структура, количественная оценка неопределенности…) и предоставляет эту информацию для расширенных алгоритмов планирования, контроля и анализа. Drake предоставляет интерфейс для Python, позволяющий быстро создавать прототипы новых алгоритмов, а также стремится предоставить надежные реализации с открытым исходным кодом для многих современных алгоритмов [2].

- Webots
- Gazebo.

Список литературы

[1] Kuindersma S., Deits R., Fallon M. et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. Auton Robot 40, 429–455 (2016). https://doi.org/10.1007/s10514-015-9479-3.sdf

[2] Tedrake R.: Drake: A planning, control, and analysis toolbox for nonlinear dynamical systems. http://drake.mit.edu (2014). URL http://drake.mit.edu

Визуализация газодинамических характеристик центробежных компрессоров

Р. И. Смирнов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
ri.smirnov.spb@gmail.com

***Аннотация*. Разработана компьютерная программа визуализации газодинамических характеристик (ГДХ) центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов по основным технологическим параметрам процесса компримирования. Принята аналитическая форма ГДХ в виде полиномиальных кривых Мура–Грейтцера, описывающая зависимость напора от расхода газа на всем диапазоне изменений, включая области помпажа. Модель дополнена параметром, позволяющим учитывать зависимость напора от относительной частоты вращения ротора компрессора. Программа предназначена для идентификации расширенных ГДХ по экспертным данным методом подстраиваемых параметров.**

Ключевые слова: центробежный компрессор; газодинамическая характеристика; помпаж; газоперекачивающий агрегат; модель Мура-Грейтцера; идентификация; управление

I. Введение

Газодинамические характеристики (ГДХ) центробежных нагнетателей (ЦБН) природного газа, входящих в состав газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных цехов магистральных газопроводов, строятся по данным экспериментов и представляются заводами-изготовителями в графической форме. Традиционно графики ГДХ отражают нелинейную зависимость $\varepsilon\,(Q, n)$ степени сжатия газа $\varepsilon = P_o/P_i$ (P_o, P_i – давления газа на выходе и входе ЦБН) от объемного расхода Q перекачиваемого газа в нормальных режимах и имеют вид семейства кривых для различных значений относительной частоты вращения нагнетателя $n = N/N_{ном}$. Пример ГДХ компрессора типа 291ГЦ2-385/53-76М ($N_{ном}$ = 5100 об/мин), на которую нанесены статические характеристики сети $\varepsilon\,(Q, \sigma)$, изображен на рис. 1 (проводимость сети σ = 90 … 150) [1]. Совмещение ГДХ компрессора и сети (нагрузки нагнетателя) позволяет найти установившиеся значения давления и расхода перекачиваемого газа в нормальных режимах.

Необходимость перестроения и расширения стандартных графиков ГДХ возникает в силу нескольких обстоятельств. Во-первых, ГДХ зависят от свойств газа и атмосферных условий.

Во-вторых, в задачах анализа и синтеза систем управления графики ГДХ $Q(n, \varepsilon)$ или $Q(n, P_0)$ удобно представлять как функцию частоты вращения n, а в качестве следствий – выбирать переменную P или Q. Это определяется тем, что в системах управления процессом компримирования газа ЦБН с газотурбинным приводом выполняет функцию исполнительного органа. Тогда графики ГДХ удобно перестроить так, чтобы по оси абсцисс откладывались значения частоты вращения – управляющего воздействия на объект.

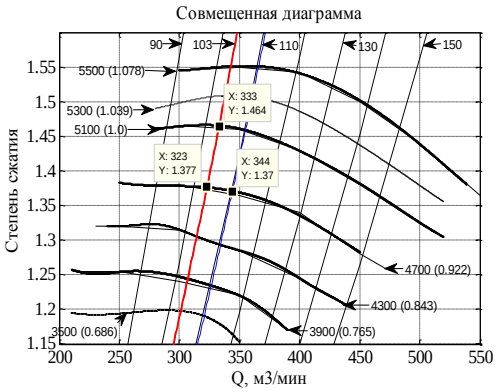


Рис. 1. Совмещенная диаграмма (приводится из [1])

В-третьих, традиционно графики ГДХ строятся в предположении, что принимается, что компрессор является источником напора, т. е. давление (степень сжатия) – причина изменения расхода [2]–[4]. Вместе с тем, в силу произвола в выборе причинно-следственных отношений переменных P и Q компрессор можно рассматривать и как источник потока (расхода газа), а давление – как следствие.

В-четвертых, исследование условий возникновения помпажа в компрессорной линии (КЛ), образованной ЦБН, аппаратом охлаждения газа, антипомпажным регулирующим клапаном и трубно-крановой обвязкой, требует расширения ГДХ нагнетателя на область малых расходов. В области помпажа конкретные кривые семейства практически невозможно построить расчетным путем, а возможности экспериментов крайне ограничены. Компьютерная имитация технологических процессов компримирования природного газа основана на численных моделях КЛ, содержащих расширенные модели ЦБН.

Построение расширенных моделей ЦБН требует комбинирования аналитического и экспериментального (эмпирического) способов. Форма кривых расширенных ГДХ устанавливается исходя из теоретических положений гидромеханики [2]–[4]. Для конкретизации графиков ГДХ в зоне помпажа используется опыт эксплуатации ГПА и

экспертные знания. Неформальная процедура параметрической идентификации расширенных моделей ЦБН основана на визуальном сопоставлении графиков, что требует разработки программных средств визуализации характеристик и подстройки параметров. Приведение графиков ГДХ в соответствие с той или иной концепцией причинно-следственных отношений переменных сводится к трудоемким ручным процедурам.

II. Трехмерное представление ГДХ

Идентификация расширенных ГДХ методом подстраиваемых параметров связана с предварительной параметризацией модели – с принятием формы аналитического описания. Известен ряд примеров аналитического описания расширенных ГДХ центробежных и осевых компрессоров (например, [5]–[8]). В [1] предложена нейросетевая аппроксимация ГДХ центробежных компрессоров в рабочей зоне.

A. Кубическая характеристика Мура–Грейтцера

При номинальной частоте вращения ротора зависимость напора Ψ на выходе компрессора от расхода газа Q может быть приближенно описана полиномиальной кривой третьего порядка Мура–Грейтцера [8]

$$\Psi(Q)=\psi_0+H\left(1+\frac{3}{2}\left(\frac{Q}{W}-1\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{Q}{W}-1\right)^3\right). \qquad (1)$$

В выражении (1) параметр ψ_0 задает нижнюю границу характеристики, а значения W и H определяют полуширину и полувысоту характеристики (рис. 2). Характеристика (1) определена для всех значений расхода, что делает ее удобной при исследовании явления помпажа, а простота задания и конфигурирования параметров позволяет использовать ее в различных компьютерных моделях.

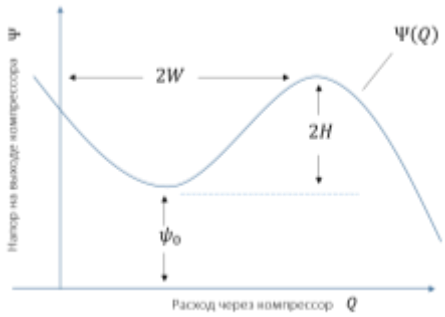


Рис. 2. Характеристика Мура–Грейтцера

B. Моделирование семейства ГДХ

Нагнетатели газа могут работать на различных частотах вращения ротора компрессора. Ставится задача отображения значения частоты вращения ротора на соответствующую ему характеристику Мура–Грейтцера.

Рассмотрим, как число оборотов n влияет на форму характеристики. Согласно [4] величина напора пропорциональна n^2, а расхода пропорциональна n

$$\frac{\varepsilon_1(Q_1)}{\varepsilon_2(Q_2)}=\frac{n_1^2}{n_2^2};\ \frac{Q_1}{Q_2}=\frac{n_1}{n_2}.$$

Следовательно

$$\varepsilon_2(Q_2)=\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\varepsilon_1\left(Q_2\frac{n_1}{n_2}\right). \qquad (2)$$

Принимая во внимание (1) и (2), запишем выражение для построения семейства ГДХ $\varepsilon(Q,n)$ в зависимости от относительного числа оборотов n. Нормированная по ψ_0 характеристика при выбранном режиме n_1 запишется так

$$\varepsilon(Q,n)=\left(\frac{n}{n_1}\right)^2\left(1+\frac{H}{\psi_0}\left(1+\frac{3}{2}\left(\frac{n_1Q}{nW}-1\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{n_1Q}{nW}-1\right)^3\right)\right). \qquad (3)$$

Выражение (3) задает поверхность (рис. 3), которую можно использовать для анализа семейства ГДХ при помощи современных средств визуализации (например, MATLAB).

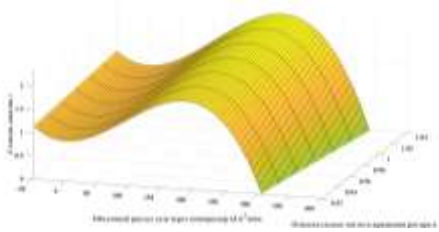


Рис. 3. Трехмерная визуализация семейства ГДХ

III. Моделирование семейства кривых

В связи с произволом в выборе причинно-следственной связи расхода (потока) газа и давления (напора) на выходе компрессора предлагается строить графики семейств характеристик компрессора в различных проекциях:

- $\varepsilon(Q, n)$ – с параметром семейства n (традиционная форма);
- $Q(\varepsilon, n)$ – «обратные» характеристики с параметром семейства n;
- $\varepsilon(n,Q)$ – зависимости степени сжатия газа от относительной частоты вращения ротора с параметром семейства Q представляют собой сечение поверхности (рис. 4) плоскостью $Q = const$.

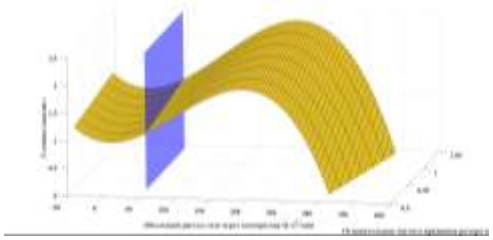


Рис. 4. Пересечение поверхности $Q(\varepsilon,n)$ плоскостью $Q = 50$

- $Q(n,\varepsilon)$ – зависимости расхода от относительной частоты вращения ротора с параметром семейства ε представляет собой сечение поверхности (рис. 5) плоскостью $\varepsilon=const$. Из-за неоднозначности соответствия $n\to Q$, одному значению n может отвечать несколько значений Q, что означает наличие у ГДХ петли гистерезиса.

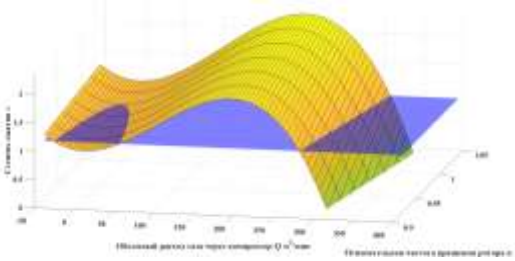


Рис. 5. Пересечение поверхности $Q(\varepsilon,n)$ плоскостью $\varepsilon=1$

Возможные семейства характеристик, образуемые технологическими параметрами процесса компримирования газа, могут быть сведены в табл. I.

ТАБЛИЦА I ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРА

	Параметр семейства		
Зависимая переменная	n	Q	ε
ε	$\varepsilon(Q, n)$	$\varepsilon(n, Q)$	–
Q	$Q(n, \varepsilon)$	–	$Q(n, \varepsilon)$

IV. ПРОГРАММА ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЕМЕЙСТВ ГДХ

Разработана программа настройки и визуализации характеристик Мура–Грейтцера в разных проекциях (рис. 6). Программа состоит из области просмотра срезов поверхности $\varepsilon(Q, n)$ по различным значениям соответствующего параметра семейства, а также области конфигурирования внешнего вида графиков. Разработана программа настройки и визуализации характеристик Мура–Грейтцера в разных проекциях (рис. 6). Программа состоит из области просмотра срезов поверхности $\varepsilon(Q, n)$ по различным значениям соответствующего параметра семейства, а также области конфигурирования внешнего вида графиков.

Разработана программа настройки и визуализации характеристик Мура–Грейтцера в разных проекциях (рис. 6). Программа состоит из области просмотра срезов поверхности $\varepsilon(Q, n)$ по различным значениям соответствующего параметра семейства, а также области конфигурирования внешнего вида графиков.

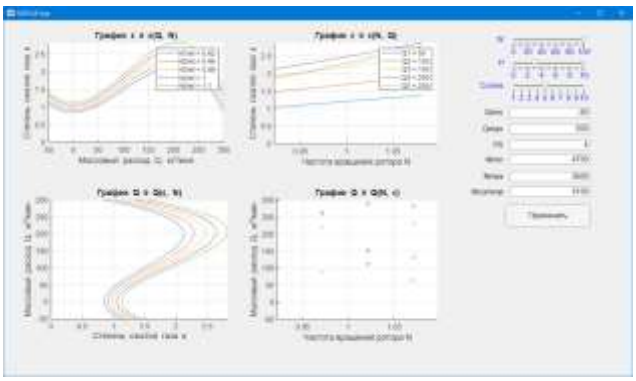


Рис. 6. Программа визуализации ГДХ

Настраиваемые параметры:

- полуширина W и полувысота H кривых;
- количество отображаемых кривых в семействах;
- нижний и верхний пределы значений расхода Q;
- нижний и верхний пределы значений частоты вращения n;
- значение частоты вращения на номинальном режиме работы.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе предложена методика визуализации и формирования семейства газодинамических характеристик центробежных компрессоров, описываемых кривыми Мура–Грейтцера. Реализующая методику компьютерная программа имеет дружественный интерфейс с быстрой адаптацией к предпочтениям пользователя и характеризуется минимальным временем на освоение, а тонкая настройка параметров отображения графиков позволяет достичь высокой гибкости при анализе ГДХ, представленных выбранным семейством кривых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Имаев Д.Х., Квашнин С.В., Шестопалов М.Ю. Моделирование технологического процесса компримирования природного газа как объекта управления. Установившиеся режимы // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 6. С. 13–22.

[2] Боднер В.А. Автоколебания в системе, содержащей компрессор// Инженерный сборник. М.: Изд-во АН СССР, т. VI, 1950. С. 177–184.

[3] Emmons H. W., Pearson C. E., Grant H. P. Compressor surge and stall propagation// Trans. ASME, vol. 77, 1955. Pp. 455–469.

[4] Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах. М.: Машиностроение, 1974. С. 264.

[5] Fink D.A., Cumpsty N.A., Greitzer E.M. Surge dynamics in a free-spool centrifugal compressor system // J. Turbomachinery, vol. 114, 1992. Pp. 321–332.

[6] Gravdahl J.T. and Egeland O. Centrifugal Compressor Surge and Speed Control// IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 7, no. 5, 1999. Pp. 567–579.

[7] Helvoirt van J. Centrifugal compressor surge: modeling and identification for control – Technische Universiteit Eindhoven, 2007. P. 219. https://doi.org/10.6100/IR629084

[8] Moore F.K., Greitzer E.M. A theory of poststall transients in a axial compressor systems Part I. Development of equations// Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 108, 1986. Pp. 68–76.

Лабораторный стенд для исследования индуктивных датчиков перемещения

Е. А. Фролова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
eafrolova@stud.etu.ru

***Аннотация*. В данной работе были рассмотрены и изучены конструкция и принцип действия плунжерного индуктивного датчика перемещения, разработана методика измерения основных характеристик датчика и конструкция лабораторного стенда. Результатом работы стал изготовленный лабораторный стенд для изучения индуктивного датчика перемещения и методические указания по проведению лабораторной работы.**

Ключевые слова: лабораторный стенд, индуктивный датчик перемещения

I. Основные теоретические сведения об индуктивных датчиках перемещения

Индуктивные датчики перемещения относятся к электромагнитным аналоговым датчикам прямого преобразования и служат для бесконтактного получения информации о перемещениях (линейных или угловых) рабочих органов механизмов и преобразования этой информации в электрический сигнал.

В данной работе рассмотрены конструктивные особенности и принцип действия преобразователей плунжерного типа (с сердечником), так как лабораторную установку именно с таким преобразователем планируется делать в ходе выполнения работы.

Преобразователи плунжерного типа используются для измерения перемещений до 50 мм и более [1] и имеют разомкнутую магнитную цепь.

В основу принципа действия плунжерных преобразователей положено изменение магнитного сопротивления цепи магнитного потока, которое создается намагничивающими обмотками во время перемещения сердечника. Простейшие элементы конструкции (индуктивной катушки) такого типа датчиков представлены на рис. 1, где 1 – катушка, 2 – подвижный ферромагнитный сердечник, 3 – неферромагнитный стержень.

Индуктивность катушки L является сложной нелинейной функцией глубины перемещения стержня внутри катушки. Без сердечника индуктивность катушки стабильна, а при появлении внутри ферромагнитного сердечника она начинает расти в результате уменьшения магнитного сопротивления и последующего увеличения общего магнитного потока в магнитной цепи.

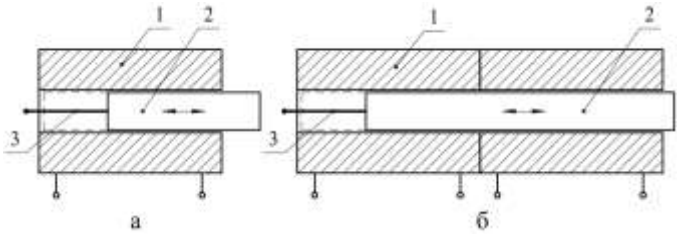


Рис. 1. Элементы индуктивного преобразователя: а – односекционная катушка, б – двухсекционная катушка

Тогда необходимо определить индуктивность как некоторую функцию от перемещения стержня x, нулевым значением перемещения примем то, в котором индуктивность катушки максимальна – при полном погружении стержня на длину катушки, а положительным значением перемещения – при котором появляется и увеличивается воздушный зазор: $L = f(x)$.

Для того чтобы получать удобный выходной сигнал с преобразователя, датчик включается в измерительную цепь. Рассмотрим два способа измерения: непосредственный (одиночный датчик) и дифференциальный (мостовой датчик), их схемы представлены на рис. 2.

A. Индуктивные датчики непосредственного измерения

В случае непосредственного измерения (рис. 2*а*) последовательно с односекционной катушкой индуктивности в цепь включается нагрузочный резистор сопротивлением $R_н$. При увеличении воздушного зазора уменьшается индуктивность L катушки, что приводит к уменьшению ее индуктивного сопротивления X_L и увеличению тока в цепи катушки.

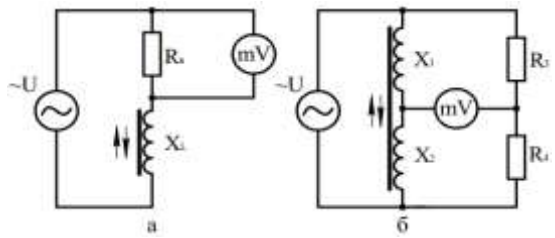


Рис. 2. Схемы подключения плунжерных индуктивных датчиков перемещения: а – непосредственный (одиночный), б – мостовой (дифференциальный)

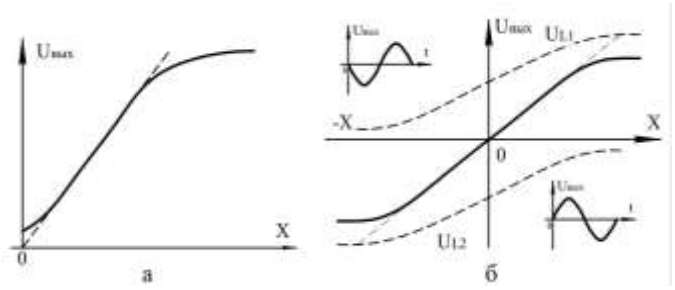


Рис. 3. График статической характеристики: а – одиночного индуктивного датчика, б – дифференциального индуктивного датчика

В результате этого на сопротивлении $R_н$ возникает падение напряжения $U_н$, зависящее, в конечном счете, от величины перемещения x плунжера внутри катушки.

Теоретический вид кривой зависимости напряжения на выходе датчика $U_{вых} = U_н = f(x)$ от перемещения плунжера представлен на рис. 3*а*. Из графика видно, что характеристика имеет значительную нелинейность, поэтому непосредственный способ измерения используется редко

B. Дифференциальные индуктивные датчики

Более распространенными измерительными цепями индуктивных преобразователей являются дифференциальные (мостовые, двухтактные) цепи (рис. 2*б*), где два плеча моста составляют полные сопротивления секций дифференциального преобразователя (двухсекционной катушки индуктивности), а два других плеча моста – активные сопротивления.

В двухсекционную катушку помещается ферромагнитный сердечник, который через неферромагнитный стержень соединен с объектом, перемещение которого необходимо определять.

Условие равновесия схемы определяется условием: для равновесия мостовой (дифференциальной) схемы необходимо, чтобы произведения модулей полных сопротивлений накрест лежащих плеч моста, а также суммы их углов фазовых сдвигов были равны между собой. То есть для достижения равновесия моста необходимо, чтобы полные сопротивления секций катушки были равны. Таким образом, при некотором среднем положении сердечника, индуктивности будут равны, а при перемещении сердечника условие равновесия моста будет нарушено, и выходное напряжение моста будет меняться.

На рис. 3*б* представлена статическая характеристика дифференциального датчика $U_н = f(x)$.

II. Разработка лабораторного стенда

Для проектирования стенда первым делом необходимо определиться с требованиями к лабораторной установке, в разработке должны быть учтены следующие важные показатели стенда для работы студентов:

- наглядность – максимально открытое устройство, чтобы было видно все элементы системы, и абсолютно понятен принцип ее работы;
- надежность – качественное и конструкционно выверенное выполнение для возможности длительного использования без необходимости в ремонте;
- небольшая стоимость – для возможности реализации без необходимости привлечения средств;
- мобильность и компактность – возможность переносить с места на место без особых сложностей;
- возможность модернизации – выполнение, подразумевающее возможность последующего улучшения стенда.

После рассмотрения принципа действия и основных характеристик датчиков на основании требований, была разработана конструкция лабораторного стенда. Общий внешний вид установки представлен на рис. 4.

На рис. 4 двойная катушка индуктивности 1 закреплена на опоре 2, на боковой стенке которой расположены клеммы 3 с выводами обеих секций катушки. Выводы подключены к плате с измерительной схемой 4. Слева от опоры под катушку стоят опоры под подшипники 5, в которых закреплен ходовой винт 6. Винт приводится во вращательное движение с помощью ручки 7. Так же к опорам прикреплен электронный штангельциркуль 8, подвижная рамка которого соединена с ходовым винтом, и при его вращении подвижная рамка с дисплеем 9 линейно перемещается. При ее перемещении через крепление перемещается сердечник 10 внутри катушки. Вся конструкция закреплена на основании 11.

Свободный ход штангенциркуля составляет 54 мм. На рис. 5 подробнее представлен внешний вид платы с измерительной схемой. Элементы схемы имеют буквенные обозначения, а выводы (крючки) для подключения к схеме обозначены цифрами.

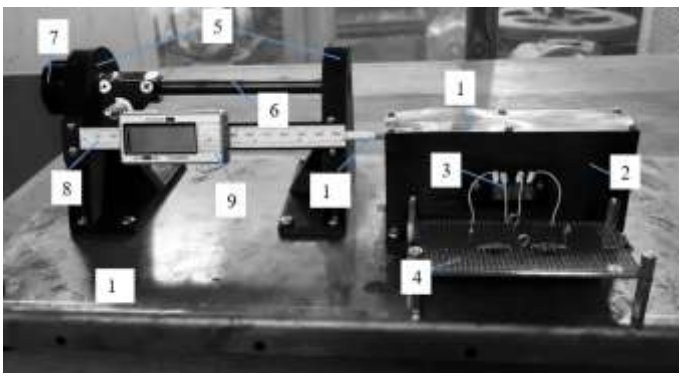


Рис. 4. Рабочая часть лабораторного стенда для исследования индуктивного датчика перемещения

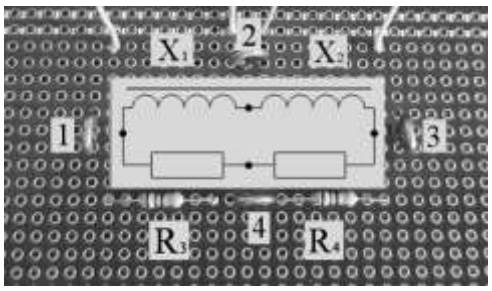


Рис. 5. Плата измерительной схемы

В зависимости от вида исследуемой измерительной цепи, генератор и мультиметр (вольтметр) будут подключаться к разным выводам.

При исследовании одиночного датчика:

- питание установки (генератор напряжения переменного тока) подключается к выводам 2 и 4;
- измерительный прибор (мультиметр/ вольтметр/ милливольтметр) подключается к выводам 1 и 4 или 3 и 4 в зависимости от того, характеристика какой катушки исследуется.

При исследовании дифференциального датчика:

- питание установки подключается к выводам 1 и 3;
- измерительный прибор – к выводам 2 и 4.

III. Испытание лабораторного стенда

После того как установка была собрана, были проведены ее испытания.

Испытания стенда проводились для двух измерительных схем, представленных на рис. 2, с одинаковыми условиями входного генерируемого синусоидального сигнала:

- амплитуда подаваемого напряжения – U_m = 5 В;
- частота подаваемого сигнала – f = 1000 Гц.

В ходе испытаний требовалось выявить зависимость выходного сигнала датчика от перемещения сердечника, и аппроксимировать полученные данные полиномиальной функцией.

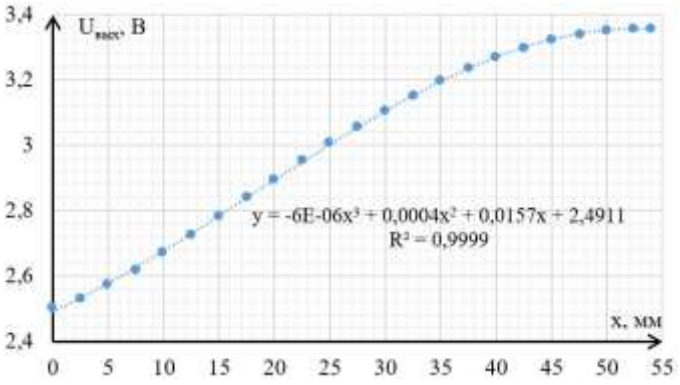


Рис. 6. График зависимости $U_{вых} = f(x)$ для одиночного датчика

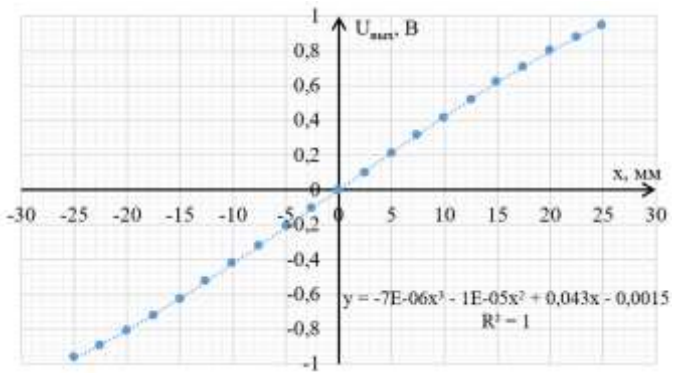


Рис. 7. График зависимости $U_{вых} = f(x)$ для дифференциального датчика

Измерения проводились для одиночного датчика на всем диапазоне перемещения сердечника (нулем принималась точка, в которой выходной сигнал имел наименьшее значение), для дифференциального – также на всем диапазоне перемещения сердечника, но в обе стороны от нуля, в качестве которого была принята точка, где выходной сигнал был близок к нулю.

В обоих случаях измерения проводились несколько раз (всего по три), чтобы исключить влияние люфтов механизма и статической погрешности штангенциркуля на результаты эксперимента.

Графики зависимостей, построенные по результатам опытов, представлены на рис. 6 и 7 для одиночного и дифференциального датчика, соответственно, где точками представлены результаты эксперимента, прерывистой линией – линия аппроксимации, формула которой представлена на графике, а R^2 – величина достоверности аппроксимации, автоматически рассчитанная программой Excel, с помощью которой и были построены графики.

Таким образом выглядят преобразовательные характеристики для двух измерительных схем разработанного индуктивного датчика перемещения, что соответствует виду теоретических зависимостей, рассмотренных в первом разделе данной работы.

Благодарность

Выражаю благодарность зав. лабораторией электрических машин В. Г. Вейнмейстеру и доц. кафедры РАПС К. В. Константинову за помощь в организации изготовления и испытания стенда.

Список литературы

[1] Зудин В.Л., Жуков Ю.П., Маланов А.Г. Датчики: измерение перемещений, деформаций и усилий: учебное пособие для среднего профессионального образования. М.: Юрайт, 2021. 201 с.

Анализ систем управления переработкой мусора

А. В. Хабаров
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
artkhab@mail.ru

***Аннотация*. В статье сравниваются различные системы управления переработкой мусора. Также дается описание самым используемым и распространенным принципам (механическая, магнитная, электродинамическая, жидкостная и оптическая сепарации) сортировки мусора.**

Ключевые слова: переработка мусора; автоматизация; системы управления; сепарация

Автоматизация сортировки твердых коммунальных отходов теоретически решила бы все проблемы с мусором. Основная проблема в решении данной задачи это изменение состояния и свойств смешанных твердых коммунальных отходов в течение года.

Когда говорят, что надо весь мусор перерабатывать, мало кто задумывается, что превратить все виды отходов в новые материалы может обойтись слишком дорого.

Если мусор похож на кашу, разделить его очень сложно. Это потребует значительных затрат, гораздо больших, чем сжигание, дополнительную энергию, больше времени и человеческого труда. Мойка и подготовка грязного вторсырья требует значительного расхода воды, а также строительства водоочистных сооружений. Даже стоимость извлеченного вторсырья не покроет эти затраты, т.к. выделенное сырье не будут покупать по высокой цене [3].

В связи с этим при построении автоматических линий сортировки мусора следуют следующим принципам:

1) Технологии выбираются в зависимости от поступающего сырья.
2) Экономическая целесообразность зависит от степени извлечения и качества получаемого сырья.
3) Перспектива изменения вида и состава отходов.
4) Учитывается существующая практика обращения с отходами в конкретном регионе.

Теперь рассмотрим и сравним различные подходы к сортировке отходов:

I. Механическая сортировка отходов

Методы механической обработки отходов основаны на разных физических свойствах отдельных компонентов, находящихся в смешанном мусоре.

Для разделения отходов по размеру применяются различные методы грохочения. Смысл грохочения заключается в том, чтобы просеять мелкие части, которые не могут использоваться как вторичные материальные ресурсы.

Недостатком данного способа является низкая точность. Как правило, механическую сортировку используют, чтобы разделить мусор на две фракции: крупную, в которую входят полиэтиленовая тара, пленки, различные металлы, древесина, резины, и малую, так называемый отсев – в основном, органические компоненты, смет, земля и песок. После разделения на фракции следует еще один этап, на котором происходит выделение из отходов сырья, пригодного для вторичной переработки.

Для оптимизации процесса переработки имеет смысл установки дополнительных датчиков (например, инфракрасных) на аппараты грохочения, по информации с которых, просеянные фракции будут сразу же разделятся на различные группы.

II. Магнитные сепараторы

Магнитные черные металлы довольно легко отделяются с помощью магнитов. Различают постоянные магниты и электромагниты. Постоянные магниты с высокой коэрцитивной силой получаются дороже электромагнитов. Зато им не требуется электрическая энергия.

Эффективность магнитного разделения зависит от толщины слоя отходов на конвейере, а также размера и формы немагнитных материалов. Когда материалы имеют сильно развитую поверхность (картон, скомканная бумага и т. д.) при магнитной сепарации имеет место «ложный съем» немагнитного материала в месте с магнитным [4].

III. Электродинамические сепараторы

Работа электродинамического сепаратора основана на взаимодействии магнитного поля индукторов с вихревыми токами, наведенными им в металлических предметах.

Наиболее часто применяются электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем, создаваемым трехфазными линейными индукторами, либо с перемещаемыми магнитами. Разделение может происходить на главном барабане (шкиве) или на наклонной поверхности из пластин нержавеющей стали. [2]

IV. Жидкостные способы сортировки отходов

Жидкостные способы основаны на различном поведении частиц мусора в жидкой среде. Например, в воде относительно просто разделить материалы на «плавающие» и «тонущие». При гидросепарции твердых бытовых отходов помимо разделения на «плавающее – не плавающее» в воду во взвешенном состоянии переходят органические частицы, которые могут быть выделены и направлены на дальнейшую обработку.

Флотацией можно разделять мелкие частицы по смачиваемости, но в отношении общего потока мусора флотация не применяется. Использование воды для разделения мусора на фракции ограничено в странах с холодным климатом, а также из-за необходимости в очистных сооружениях.

V. Оптическая сепарация

Развитие микропроцессорной техники и совершенствование оптических сенсоров позволили создать системы автоматического распознавания материалов по цвету, размеру и химическому составу. В зависимости от заложенной программы исполнительные механизмы производят разделение материалов.

В качестве исполнительных механизмов стали популярны пневматические форсунки, «отстреливающие» нужные материалы. На этом принципе основано большинство конструкции современных оптических сепараторов. Кроме этого используются механические заслонки и экраны. [5]

В зависимости от количества отходов, образующихся на расчетную единицу, применяются различные стратегии по организации переработки отходов.

В настоящее время требования к утилизации отходов постоянно ужесточаются, поэтому вопрос переработки мусора встает более остро. В зависимости от того, на какое вторичное сырью нацелена компания, могут использоваться различные комплексные подходы к сортировке мусора.

Процесс переработки мусора можно сильно упростить, если разделения мусора на различные группы будет проходить на этапе его сбора. Именно поэтому этап сепарации мусора так важен. От того, насколько точно будет произведено разделение, будет зависеть конечная стоимость вторичного сырья.

Таким образом мусор проходит следующий цикл: сбор, транспортировка, сортировка, сепарация, обработка, переработка, рециклинг. Как правило, процессы сортировки, сепарации и обработки происходят в одном месте (или же в нескольких очень близких местах). Некоторые компании занимаются именно сбором отходов и подготовкой их к переработке, продавая перерабатывающим предприятиям сырье. Если же мы рассмотрим компании, которые занимаются полным циклом переработки (ВТХМ – АВИТЕХНО, Красноярский мусоросортировочный завод Чистый город и др.), то заметим, что мусор, после доставки на завод, проходит на нем весь остальной цикл. Как правило, привозимый мусор проходит через различные сортировочные аппараты (о принципах которых писалось выше), затем по группам отправляется сначала на обработку, а затем на переработку во вторичное сырье [1].

В заключении хотелось бы отметить две вещи. Из-за того, что на этапе сбора не происходит никакой предварительной сепарации, мусороперерабатывающие компании вынуждены тратить множество сил на подготовку вторичного сырья, что неизбежно сказывается на его качестве из-за наличия примесей. На данный момент набирает популярность оптическая сепарация с использованием микропроцессорных систем и инфракрасных камер для более точного определения материала отходов.

Список литературы

[1] Хорошавин Л.Б., Беляков В.А., Свалов Е.А. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов. Мин-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 220 с.

[2] Schloemann E. Separation of nonmagnetic metals from solid wastes // J. of Applied Physics, 1975, vol. 46, No 11, p. 5012-5020.

[3] Барцев И.А., Доценко И.С. Характеристика системы управления переработкой ТБО: структура и составные элементы // Нижегородский государственный университета им.Н.И.Лобачевского 16 с.

[4] Мищенко А.С., Тишин А.М. Магнитные сепараторы - многообразие конструкций// wwwndfeb.ru/articles/separat.html.

[5] Галкин Е.В. Умные фотосепараторы: нейронный алгоритм в решении нестандартных задач сортировки // Хлебопродукты. № 5/2016.

Исследование и разработка чат-ботов целевого назначения

И. В. Цыварев
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
cyvarev.ilya156@gmail.com

***Аннотация*. В докладе будет дан обзор основных сфер использования чат-ботов, экономических и технических преимуществ их использования, а также представлен опыт разработки чат-бота для решения задач на предприятии.**

Ключевые слова: чат-бот, ассистент, обслуживание, чат, мессенджер, клиент

I. Общий анализ сферы использования чат-ботов

A. Причины использования чат-ботов

В наше время в разных социальных сетях и сервисах повсеместно используются системы взаимоотношений с клиентом типа «чат-бот». Данный метод коммуникации с пользователями стал популярен благодаря множеству достоинств, таких как:

- возможность автоматизации и оптимизации повторяющихся задач;
- возможность круглосуточной беспрерывной работы;
- исключение человеческого фактора из коммуникации;
- доступ к применению алгоритмов искусственного интеллекта.

Совокупность всех этих достоинств делает использование чат-ботов особенно полезным в сферах продаж, создания личных ассистентов, обеспечении технической поддержки и обслуживании клиентов. На рис. 1 представлены основные сферы использования чат-ботов по исследованию компании Intercom [1]. На нём можно увидеть, что в 41 % случаев данную технологию используют в сфере продаж, в 37 % случаев – в сфере поддержки пользователей, в 17 % случаев – в маркетинге и в 5 % случаев – в других сферах.

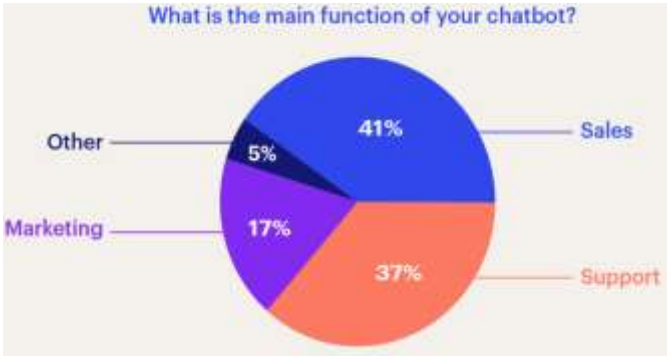


Рис. 1. Основные сферы использования чат-ботов

B. Основные платформы для размещения чат-ботов

Основными платформами для использования чат-ботов являются как веб-ресурсы различных компаний (в большинстве подобных случаев чат-бот доступен для взаимодействия в отдельном окне с диалогом), так и социальные сети и мессенджеры. В случае с мессенджерами, основными платформами являются:

- Telegram;
- Социальная сеть «Вконтакте»;
- Viber;
- Социальная сеть Facebook;
- Whatsapp.

Для большинства из вышепредставленных платформ существуют API и библиотеки для разработки и размещения чат-ботов.

II. Экономический фактор внедрения чат-ботов

A. Пользы и риски использования чат-ботов

Внедрение чат-ботов в большинстве случаев даёт экономическую выгоду компании, которая интегрирует данную технологию в свою информационную систему. Это следует как из устранения потребности в сотрудниках, выполняющих аналогичную функцию, так и из оптимизации времени обработки сообщений от пользователей. Но при этом в процессе использования чат-

ботов возникают определенные экономические риски, такие как:

- малый уровень желания людей использовать чат-ботов вместо сотрудников [2];
- сложность внедрения в устаревшие системы;
- ошибки при формировании вариантов использования use-case;
- возможность образования лазеек в сфере безопасности предприятия;
- малый объем тренировочных данных (в случае чат-ботов, способных к обучению).

B. Возможности устранения рисков

Каждый риск способен в той или иной мере повлиять на экономическую пользу использования данной технологии, или вовсе свести её к отрицательной, делая бесполезной идею внедрения чат-бота в информационную систему предприятия. Во избежание подобных случаев необходимо ответственно подойти к проектированию и анализу внедрения чат-бота в информационную систему, приняв в учет время работы человека с чат-ботом и тщательно проработав его варианты использования.

Кроме того, необходимо, чтобы система была готова к интеграции чат-бота с технической стороны. Для использования актуальных технологий по внедрению и обслуживанию данной технологии, система должна поддерживать ныне использующиеся технологии и протоколы передачи данных. То же касается и уровня информационной безопасности системы, поскольку для корректного использования чат-ботов необходимо исключить возможность использования SQL-инъекций и прочих популярных методов атак.

III. Особенности разработки чат-бота

A. Разработка и размещение

Поскольку чат-боты в основном размещаются на веб-ресурсах в сети Интернет, для их создания используются языки, имеющие возможность создания серверной платформы, на которой будет располагаться чат-бот.

По данным различных интернет-изданий основными языками для разработки чат-ботов являются Python, Java и Node.js. Данные языки выбирают благодаря высокому уровню функциональной поддержки, большому выбору библиотек и простой интеграции с существующими системами.

Для размещения и интеграции чат-бота, в свою очередь, необходимо иметь сервер, на котором будет размещен чат-бот, и программный слой для хранения данных (в том случае, если работа чат-бота требует взаимодействия с данными системы). В таком случае для работы с чат-ботом необходимо будет лишь настроить коммуникацию между человеком и ботом — реализовать отправку запросов с клиента на сервер и обратно.

B. Сложности в разработке чат-бота

Несмотря на кажущуюся простоту разработки чат-бота, в данном процессе могут возникнуть различные проблемы, которые могут привести к необходимости смены подхода или средств реализации. К таким проблемам относятся отсутствие открытого API для платформы размещения (мессенджера) и малая степень масштабируемости ботов с возможность обучения.

С первой проблемой можно столкнуться в том случае, если разработка бота ведётся для какого-либо мессенджера или социальной сети, не имеющей общедоступного API или библиотек для работы с чатами. В этом случае необходимо пересмотреть вопрос касательно размещения чат-бота на конкретной платформе, или же рассмотреть иные языки для его разработки.

Со второй проблемой сталкиваются исключительно чат-боты, функционал которых завязан на использовании моделей машинного обучения, и бороться с ней значительно сложнее из-за относительной «молодости» сферы использования нейросетей и машинного обучения.

IV. Заключение

Рассматривая возможности использования чат-ботов с точки зрения инструмента для оптимизации коммуникации с клиентом, возникает множество перспектив для их внедрения и использования. Благодаря простоте и широкому функционалу большинства популярных мессенджеров интерфейс любого веб-сервиса можно перепрограммировать в чат-бота, которым будет удобно пользоваться и легко настраивать. Однако при этом, данная технология имеет определенные условия для использования и неизведанный потенциал для дальнейшего развития.

Список литературы

[1] Where chatbots are headed in 2021 [Электронный ресурс] // Intercom: ин-форм. портал. – Режим доступа: https://www.intercom.com/blog/the-state-of-chatbots/ (03.09.2021)

[2] Why Chatbots Fail: Limitations of Chatbots [Электронный ресурс] // Medium: ин-форм. портал. – Режим доступа: https://medium.com/voice-tech-podcast/why-chatbots-fail-limitations-of-chatbots-7f291c4df83f (03.09.2021)

Инновационная система промышленной регламентации малых расходов гранулированных материалов

М. Чернуха
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
cernuha@mail.ru

Д. Г. Митрошин
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
mitroshindg@yandex.ru

***Аннотация*. В докладе рассмотрены новые способы автоматического контроля и управления расходом, а также порционного дозирования гранулированных сыпучих материалов. Приводятся результаты экспериментальных исследований и теоретического моделирования. Поставлен ряд задач дальнейших исследований и разработок.**

Ключевые слова: гранулированные материалы; управление расходом сыпучих материалов; автоматическое дозирование

I. Введение

В данной работе рассмотрены вопросы разработки, исследования и моделирования пневматических способов и автоматических систем непрерывного и дискретного управления и контроля количества и расхода гранулированных (зернистых) сыпучих материалов. Применение для решения этих задач способа одновременно и силового, и управляющего пневматического воздействия на материал позволяет получить ряд новых положительных эффектов, однако требует значительного числа экспериментальных исследований и теоретических обобщений, ранее не рассматривавшихся при разработке промышленных автоматизированных технологических комплексов.

II. Терминология

Далее в тексте доклада используется ряд терминов, характерных для разработок в области автоматизации технологических процессов непрерывных производств в химической и смежных отраслях промышленности. Применение специфической терминологии позволяет наиболее полно характеризовать рассматриваемые методы и системы, которые в большинстве случаев относятся к принципиально новым техническим решениям. Понятие о **регламентации** количества вещества было введено в восьмидесятых годах прошлого века в работах А.Л. Гуревича и М.В. Соколова применительно к системам автоматического дозирования жидких сред [1]. Необходимость использования особого термина была вызвана тем, что автоматические дозаторы жидкости рассматривались одновременно и как измерительные преобразователи количества вещества, и как исполнительные устройства систем автоматического регулирования технологических параметров. Само по себе достаточно часто используемое в технической литературе понятие «**дозирование**» также требует уточнения. До недавнего времени принятое определение понятия дозатора как устройства для отмеривания заданного количества вещества ограничено по существу и не отвечает реальной ситуации в силу упомянутой выше бифункциональности автоматических дозаторов. В литературе, и даже в стандартах, определение понятия дозирования отсутствует. В описаниях промышленных систем управления дозаторами часто называют обычные системы непрерывного регулирования расхода [2]. Особенно явно это несоответствие проявляется применительно к дозированию сыпучих материалов. В ряде случаев в качестве дозаторов рассматриваются устройства, в которых вообще отсутствует обратная связь по расходу или количеству вещества [3]. Поэтому для определённости принимается расширенное определение, впервые приведённое в [1]: дозатор рассматривается как система для отмеривания и выдачи заданных порций (доз) вещества или материала с погрешностью, не превышающей установленного класса точности. При таком подходе к процессу автоматического дозирования предполагается, что обратная связь в системе установлена непосредственно по количеству дозируемого вещества [4]. Дозаторы можно применять и для управления расходом, но при этом выходной расход будет реализован в дискретной форме. **Питатели** будем определять как автоматические системы регулирования расхода. Обратная связь в питателях организуется по расходу материала или по косвенному параметру, функционально связанному с расходом, например, по скорости перемещения привода рабочего органа. С помощью питателей управляют расходом материала. Погрешность питателей в общем случае больше, чем у дозаторов.

Гибридным оборудованием будем называть технические средства, которые выполняют одновременно технологические функции и функции средств измерения или исполнительных устройств (ИУ) автоматических систем регулирования (АСР) технологических параметров. К ним относятся, например, приводы сепараторных вентиляторов, по электрическим характеристикам которых можно оценить тонкость помола цемента; пневмовинтовые подъёмники для сыпучих материалов, которые можно

использовать как расходомеры и ряд других агрегатов [5]. Наиболее ярко возможность использовать одновременно несколько технической системы проявляется у пневматических систем объёмной регламентации количества и расхода зернистых (гранулированных) сыпучих материалов [6]. Только за счёт изменения режима питания сжатым воздухом, практически без изменения конструкции, эти системы могут выполнять функции технологических подъёмников и транспортёров, ИУ дискретного или непрерывного действия в АСР технологических параметров, автоматических дозаторов [7], расходомеров сыпучих материалов [8] и ряд других.

III. Актуальность темы

В промышленных технологических процессах переработка сыпучих и, в частности, гранулированных материалов широко применяется в различных отраслях промышленности. Там, где количество перерабатываемых материалов сравнительно невелико – в фармацевтической, пищевой и в ряде процессов химической промышленности, расходы составляют до нескольких сотен килограммов в час. Именно здесь предъявляются максимальные требования к качеству переработки, в особенности – к точности отмеривания заданных количеств компонентов, сохранению целостности частиц и к безопасности обращения с ними. Применяемые в технологических процессах механические устройства достаточно сложны, металлоёмки и дороги. Специфика сыпучих материалов такова, что даже в массивах, состоящих из зёрен, всегда присутствует мелкая фракция, неизбежно попадающая в контакты кинематических пар и в окружающую среду. Влага из окружающего воздуха, проникающая через зазоры между механическими элементами, в большинстве случаев негативно воздействует на перерабатываемые материалы. Для привода дозирующих и транспортных систем в подавляющем большинстве агрегатов используются электродвигатели, что создаёт дополнительные проблемы, связанные с обеспечением безопасности производства. Эффективная альтернатива в таких случаях – применение пневматики. Как показали выполненные на кафедре автоматизации процессов химической промышленности СПбГТИ(ТУ) исследования, перемещение сыпучих материалов в потоке газа позволяет решить ряд проблем, возникающих при механическом воздействии, в частности обеспечить герметичность аппаратов, избежать необходимости применения любых подвижных элементов, Наглядным подтверждением правильности такого подхода служит всё более широкое и успешное внедрение в промышленные технологии пневматического транспорта сыпучих материалов. Вместе с тем, далее будет показано, что прямой перенос методов, средств и теории пневмотранспорта на системы контроля и управления перемещением сыпучих материалов в потоке газа возможен далеко не всегда. Специфика физико-механических свойств двухфазных потоков «газ – сыпучее вещество», имеющих переменный расход требует особых подходов при разработке способов и средств воздействия на них, а также при создании математических описаний и синтеза АСР расхода, каковыми являются системы автоматической регламентации сыпучих веществ и материалов.

IV. Объекты и задачи исследования

В общем случае пневматическая система регламентации регулируемых параметров сыпучих материалов представляет собой АСР расхода, содержащую три основных узла (рис. 1): исполнительное устройство (ИУ) I, воздуходувный агрегат (ВА) II и систему управления (СУ) III. ИУ представляет собой герметичную ёмкость 1, к которой подключены три трубопровода: загрузочный материалопровод (ЗМП) 2, по которому в камеру поступает сыпучий материал, воздуховод 3 для подачи туда газа и выпускной ствол 4, по которому образовавшаяся в камере газовоздушная смесь выносится в объект подачи.

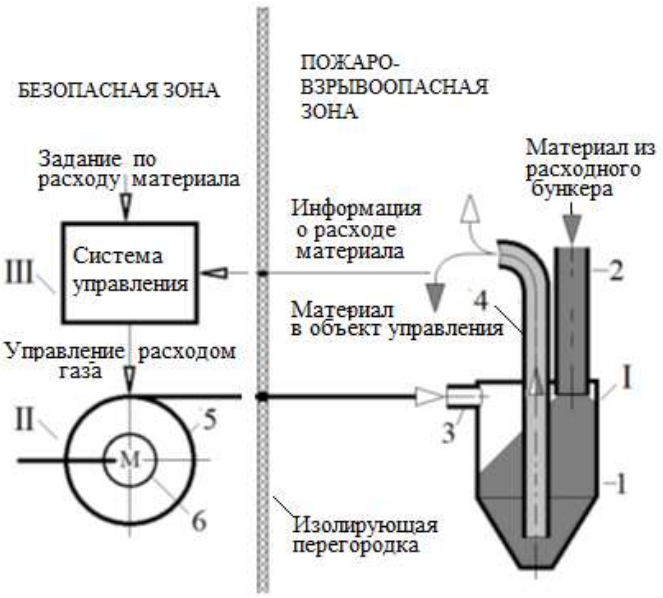


Рис. 1. Принципиальная схема непрерывного пневматического питателя для сыпучих материалов

На рисунке показана ситуация, в которой ИУ АСР, не имеющее подвижных элементов, расположено в технологической зоне, имеющей категорию пожаро-взрывоопасности, а СУ и ВА вынесены в безопасную зону. Работа АСР расхода в режиме непрерывной управляемой подачи материала происходит следующим образом. Информация о расходе поступает в СУ, выходным сигналом которой изменяется производительность ВА. В смесительной камере материал смешивается с воздухом и за счёт образовавшегося перепада между давлением в камере и давлением на выходе из выпускного ствола выносится в технологический объект. Расход материала, уносимого потоком воздуха, функционально связан с расходом подаваемого в неё воздуха. Показано, что оптимальным параметром, характеризующим текущее значение расхода, является величина давления в смесительной камере на входе в выпускной ствол [9]. По мере истечения материала из смесительной камеры, она непрерывно пополняется за счёт материала, поступающего из какой-либо расходной ёмкости по ЗМП. Данная система определена как вертикальный пневматический питатель (ВПП). В качестве гибридного технологического оборудования ВПП может служить пневматическим

подъёмником, промежуточным складом и демпфирующей ёмкостью при неравномерной подаче материала от питающего источника. Если давление в камере установить на достаточно большом значении, то в процессе выдачи материал удерживается в ЗМП, и заполнения не происходит. После полного опорожнения камеры и выпускного ствола давление в камере падает, что вызывает срабатывание реле СУ, отключающего подачу воздуха. Камера вновь заполняется. Очередная доза выдаётся после получения СУ внешнего командного сигнала. Таким образом, без изменения конструкции ВПП выполняет функции дискретного объёмного дозатора [10]. В АСР расхода сыпучего материала или в АСР какого-либо технологического параметра, зависящего от этого расхода, ВПП выполняет функции ИУ. В режиме вакуумного дискретного дозирования по воздуховоду из смесительной камеры воздух откачивается, в результате чего материал перемещается в камеру из расходного бункера, находящегося на произвольной высоте, под действием атмосферного давления. После заполнения мерной ёмкости СУ, по скачку разрежения в воздуховоде, выдаёт сигнал на выдачу дозы, которая происходит под действием внешнего избыточного давления [10]. Также с помощью вакуумного подключения мерной ёмкости реализуется расходомер сыпучих материалов [11]. Здесь измерение расхода осуществляется по величине времени её заполненения. Общим для всех перечисленных гибридных систем является наличие трубопровода с двухфазным потоком «воздух – сыпучий материал», в котором при подаче управляющего воздействия изменяются расход твёрдой и газовой фаз и, соответственно, потери давления. Описанию характеристик двухфазных потоков посвящено значительное число научно-технических работ, среди которых как имеющие инженерно-практическое назначение, можно выделить, в частности, [12, 13, 14]. Однако в литературных источниках практически отсутствуют данные об управлении расходом в таких потоках. В рассматриваемых системах, которые представляют собой АСР расхода или служат элементами АСР других параметров технологических объектов, должны быть известны как статические, так и динамические характеристики по каналу управления расходом сыпучего материала путём изменения расхода воздуха. С целью определения этих зависимостей был проведён ряд экспериментов.

V. Экспериментальные исследования

В качестве наиболее общей исходной зависимости для определения связи между выходом и входом ВПП может быть рассмотрена формула [12]

$$F_M = u \cdot S_{СТВ} \cdot \rho_M \cdot \sigma_V, \qquad (1)$$

где F_M – массовый расход твёрдой фазы; $u = v_B - \Delta v$ – средняя скорость частиц материала; v_B – скорость несущего воздуха; $S_{СТВ}$ – площадь проходного сечения выпускного ствола; ρ_M – плотность частиц; σ_V – объёмная концентрация частиц в потоке.

Неопределяемыми ни теоретически, ни экспериментально параметрами здесь являются разность скоростей несущего воздуха и материала Δv, а также концентрация твёрдой фазы σ_V. Расходные характеристики ВПП были получены экспериментально. Эксперименты проводились как с непрерывными, так и с дискретными системами регламентации зернистых сыпучих материалов, однако наиболее существенные результаты были получены при изучении исполнительных устройств непрерывного действия типа ВПП. Основная статическая характеристика ВПП – зависимость расхода твёрдой фазы F_M от расхода несущего воздуха F_B – представлена на рис. 2.

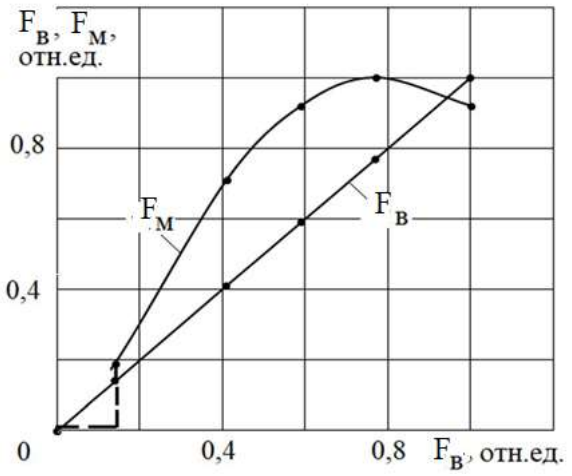


Рис. 2. Статические характеристики вертикального пневматического питателя

Анализ результатов позволяет сделать два существенных вывода:

- зависимость FM от FB существенно нелинейна, и имеет экстремум;
- увеличение расхода твёрдой фазы на некотором участке расходной характеристики опережает увеличение расхода воздуха.

Первый факт можно объяснить тем, что при увеличении расхода воздуха и соответствующем ему увеличении расхода материала возрастает сопротивление перемещению смеси, что в конечном результате приводит к режиму «завала», когда количество частиц в трубопроводе слишком велико. Очевидно, что условия начала завала определяются отношением величины проходного сечения выпускного ствола к определяющему размеру частиц. Наличие опережающего роста расхода твёрдой фазы по отношению к росту расхода несущего воздуха, кажущееся парадоксальным, можно объяснить функциональными связями выражения (1). Изменение мгновенной концентрации частиц σ_V в трубопроводе определяется не только изменением скорости u их перемещения, но и изменением их количества. Последнее определяется количеством (объёмом Q_B) воздуха, захватывающего материал из смесительной камеры. Зависимость σ_V от Q_B, а не только от скорости воздуха v_B, не рассматривается в теории пневмотранспорта и требует специальных исследований.

Второе неочевидное свойство потока двухфазной смеси иллюстрируется рис. 3.

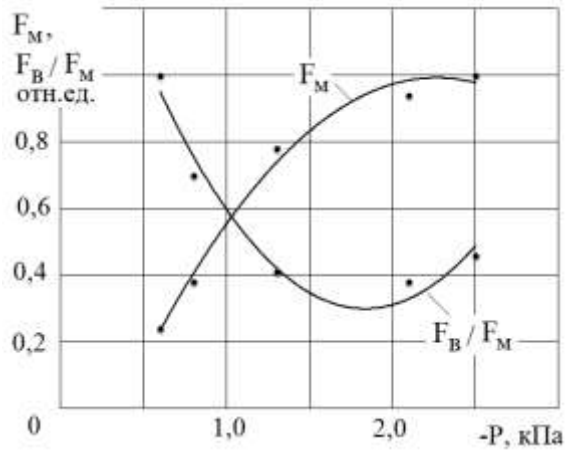


Рис. 3. Зависимость удельного расхода воздуха от давления в смесительной камере

Здесь представлена зависимость удельных затрат воздуха на перемещение материала $F_В/F_М$ от давления Р в смесительной камере, параллельно с изменением собственно расхода материала. В полном соответствии с результатами эксперимента, приведёнными на рис. 2, при достаточно большом расходе воздуха, удельные затраты увеличиваются. Полученные результаты позволяют выбрать режим дискретного дозирования и/или управления расходом сыпучего материала, с минимальными энергетическими затратами.

Ещё одним, ранее не отмеченным эффектом, сопутствующим пневматическому управлению расходом сыпучих материалов, является полученная зависимость расхода твёрдой фазы от величины и веса её частиц [5]. Наличие такой связи позволяет обеспечить компенсацию возмущений в системах управления процессам измельчения, сушки и в ряде других переделов гранулированных сыпучих материалов.

VI. Заключение

По результатам анализа проведённых исследований пневматических систем автоматического управления расходом гранулированных сыпучих материалов следует сделать вывод о том, что данный способ регламентации параметров двухфазных потоков даёт возможность использовать ряд неочевидных свойств таких сред для повышения эффективности управления технологическими процессами. Для реализации конкретных технических решений необходимо выполнить ряд углублённых исследований, позволяющих определить взаимосвязи характеристик потоков «газ – сыпучее» с конструктивными параметрами предлагаемых технических средств.

Список литературы

[1] Соколов М.В., Гуревич А. Л.Автоматическое дозирование жидких сред. Л.: Химия, 1987. 400 с.

[2] Видинее Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия. М.: Энергия, 1978. 184 с.

[3] Каталымов А.В., Любартович В.А. Дозирование сыпучих и вязких материалов. Л.: Химия, 1990.

[4] Пешехнов А.А. и др. Оптимизация процесса автоматического дозирования сыпучих материалов // Вестник СПГУТД. 2020. № 1. С. 132-136.

[5] Пешехонов А.А., Митрошин Д.Г., Чернуха М. Пневматическое управление расходом зернистых материалов с переменным гранулометрическим составом. XXVIII международная научно-техническая конференция «Приоритетные направления развития науки и технологий», Тульский государственный университет, Тула: Инновационные технологии. 2020. С. 103-106.

[6] Митрошин Д.Г. Многофункциональные пневматические системы для автоматического дозирования, контроля и регулирования расхода сыпучих материалов / А.А. Пешехонов, И.В. Рудакова, Д.Г. Митрошин, М. Чернуха // Известия СПбГТИ(ТУ). 2020. №53(79). С. 80-86.

[7] Okrepilov V.V., PeshekhonovA.A., Chernikova, A.V., Rudakova I.V. Batching Actuator Device for Granular Material: Innovative Methods and Systems // Measurement Techniques – 2019. Vol. 61, No. 11. pp.1074-1080. DOI:10.1007/S11018-019-01551-Y

[8] Патент № 2704634 Российская Федерация, МПК G01F1/76 (2006.01). Способ периодического измерения непрерывного расхода сыпучих материалов и устройство для его осуществления/ опубл. 30.10.2019 / Пешехонов А.А., Митрошин Д.Г. 10 с.

[9] Патент РФ № 2554327 / Пешехонов А.А. Способ автоматического управления непрерывным расходом сыпучих материалов и устройство для его осуществления; опубл. 27.06.2015. Бюл. №18.

[10] Пешехонов А.А., Зайцев Р.В. Импульсное автоматическое управление с регулируемой подачей сыпучих материалов в непрерывных технологических процессах // Известия СПб ГТИ(ТУ). 2011. № 12. С. 75-79.

[11] Патент РФ № 2733486 /Пещехонов А.А, Митрошин Д.Г., Рудакова И.В. Способ объёмного автоматического дозирования сыпучих материалов и устройство для его осуществления, дата приоритета 17.10.2019. 4 с.

[12] Разумов И.М. Пневмо- и гидротранспорт в химической промышленности. (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). М.: Химия, 1979.

[13] Соу С. Гидродинамика многофазных систем. Мир, Москва, 1971.

[14] Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб, Наука, 2000. 359 с.

Разработка АСУ ТП обработки ткани кислотой

О. Ю. Черняева
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
olga_0989@mail.ru

***Аннотация*. В докладе рассмотрен один из возможных вариантов частичной автоматизации процесса подготовки ткани к крашению, а именно, автоматизация кислования полотна. С помощью программного пакета Mathlab были смоделированы основные процессы системы для обеспечения их корректного выполнения. Также была разработана система визуализации для отображения происходящих в системе изменений.**

Ключевые слова: кислование ткани; разработка АСУ ТП; пропиточная ванна

I. Введение

Текстильная промышленность в мировом масштабе, как и многие другие индустрии, подвержена влиянию глобализации. Внедрение современных технологий способствуют ее постепенному переходу от производства, основанного на огромном количестве человеческих ресурсов, к автоматизированной промышленности. В России при наличии огромнейшей сырьевой базы, существующей благодаря нефтегазовой и химической промышленностям, текстильная отрасль остается недостаточно развитой. Так, доля импорта составляет 50 % [5], что свидетельствует о невозможности внутреннего рынка обеспечить необходимое количество материалов для производства.

В качестве вариантов модернизации текстильного производства можно рассматривать частичную автоматизацию отдельных технологических процессов. Одним из способов решения данной задачи может являться создание автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

II. Анализ технологического процесса

Кислование (кисловка) ткани представляет собой операцию в технологии беления хлопчатобумажных тканей при щелочно-перекисном методе отбеливания и относится к категории мокрой отделки, когда обработка ткани осуществляется с использованием растворов химических реактивов [1]. Данный процесс является промежуточным между отваркой ткани (т. е. удаление загрязнений для увеличения смачиваемости [3]) и ее белением.

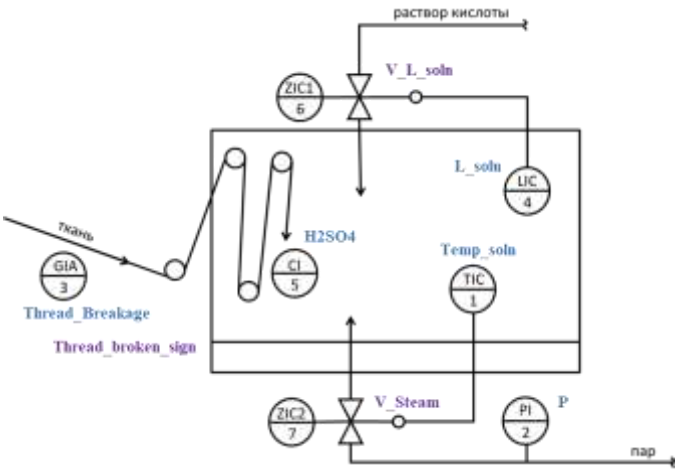


Рис. 1. Схема пропиточной ванны для кислования ткани

A. *Принцип работы производственного объекта*

Для осуществления процесса кислования, как правило, используются пропиточные ванны. Подача раствора серной кислоты в ванну осуществляется с помощью задвижки. Ванна оборудована двойным дном, которое предназначено для подогрева раствора кислоты путем подачи глухого пара с использованием задвижки [2]. При подогреве глухим паром нагреваемый раствор и подаваемый пар не смешиваются [4]. Ткань подается в ванну врасправку, что означает необходимость соблюдения требований по натяжению ткани, чтобы избежать необратимой деформации волокон полотна или его обрыва.

При этом предусмотрен контроль некоторых параметров, который осуществляется с помощью датчиков. Так, в системе присутствуют датчик температуры кислотного раствора (датчик 1), датчик давления на подаче пара (датчик 2), датчик натяжения ткани и сигнализация об ее обрыве (датчик 3), датчик уровня кислотного раствора в пропиточной ванне (датчик 4), датчик концентрации для контроля доли содержания серной кислоты в растворе (датчик 5) [2]. В системе также осуществляется регулирование некоторых параметров с помощью задвижек. Так регулирование уровня кислотного раствора в ванне осуществляется с помощью задвижки на подаче кислотного раствора, а регулирование температуры кислотного раствора осуществляется с помощью задвижки на подаче пара [2]. При этом в системе предусмотрены датчики положения задвижки на подаче раствора (датчик 6) и задвижки на

подаче пара (датчик 7). На рис. 1 изображена схема пропиточной ванны с отмеченными датчиками и задвижками.

B. Концептуальная модель системы

При рассмотрении кислования тканевого полотна с точки зрения входных и выходных воздействий более локальных технологических процессов, происходящих в системе, можно составить результирующую таблицу (табл. I), иллюстрирующую концептуальную модель системы.

ТАБЛИЦА I КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Входное воздействие	**Технологический процесс**	**Выходное воздействие**
Заданное значение уровня кислотного раствора, hз	Преобразование аналогового значения уровня в значение напряжения	Значение напряжения на преобразователе, Uз1
Значение напряжения на преобразователе, Uз1	Вращение вала электропривода	Частота вращения вала электропривода, ωэп1
Частота вращения вала электропривода, ωэп1	Открытие задвижки для подачи кислотного раствора	Угол поворота задвижки на подаче раствора, φз1
Угол поворота задвижки на подаче раствора, φз1	Подача кислотного раствора в пропиточную ванну	Расход кислотного раствора
Расход кислотного раствора	Наполнение ванны кислотным раствором	Значение уровня раствора, h
Заданное значение температуры раствора в ванне, тз	Преобразование аналогового значения температуры в значение напряжения	Значение напряжения на преобразователе, Uз2
Значение напряжения на преобразователе, Uз2	Вращение вала электропривода	Частота вращения вала электропривода, ωэп2
Частота вращения вала электропривода, ωэп2	Открытие задвижки на подаче пара	Угол поворота задвижки на подаче пара, φз2
Угол поворота задвижки на подаче пара, φз2	Подача глухого пара на двойное дно пропиточной ванны	Расход пара
Расход пара	Нагрев кислотного раствора через нагрев дна ванны	Значение температуры раствора, т
Значение натяжения полотна ткани	Подача ткани в ванну для пропитки кислотным раствором	Сигнализация об обрыве ткани на подаче

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Рис. 2. Структурная схема наполнения ванны раствором

В рассматриваемом объекте управления, т. е. в пропиточной ванне, существует два контура регулирования.

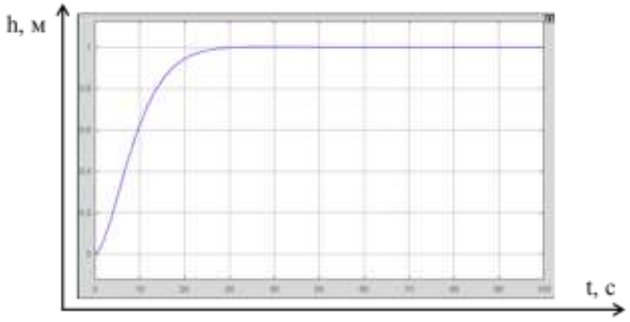


Рис. 3. Переходный процесс наполнение ванны раствором

Моделирование их работы осуществлялось помощью среды Simulink программного пакета Mathlab.

A. Моделирование процесса наполнения ванны кислотным раствором

Первый контур регулирования отвечает за регулирование уровня кислотного раствора в ванне с помощью задвижки на подаче кислоты, датчика уровня (датчик 4) и датчика положения задвижки (датчик 6).

Данному контуру соответствует структурная схема, представленная на рис. 2. Wзадh(s) соответствует передаточной функции аналого-цифрового преобразователя, Wэп1(s) – ПФ электропривода, Wз1(s) – ПФ задвижки (вместе Wзадh(s), Wэп1(s) и Wз1(s) составляют ПФ исполнительного механизма Wим1), Wh(s) – ПФ наполнения ванны раствором.

На рис. 3 показан переходный процесс после подстановки значений коэффициентов регуляторов уровня раствора Kph и положения задвижки на подаче раствора Kpsoln, подобранных с помощью инструмента Sisotool. Таким образом, смоделированная система является устойчивой и позволяет обеспечить наполнение ванны без превышения заданного значения. Заполнение ванны на 95 % до заданного уровня раствора кислоты происходит примерно за 21 секунду.

B. Моделирование процесса нагрева кислотного раствора в ванне

Второй контур регулирования отвечает за регулирование температуры раствора с помощью задвижки на подаче пара, датчика положения задвижки (датчик 7) и датчика температуры (датчик 2).

Данному контуру соответствует аналогичная первому контуру структурная схема, представленная на рис. 4. Wзадт(s) соответствует передаточной функции аналого-цифрового преобразователя,

Рис. 4. Структурная схема нагрева раствора в ванне

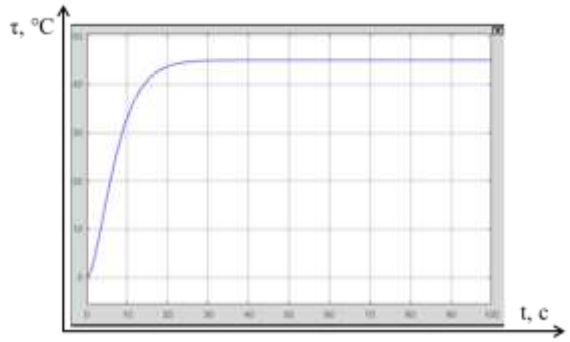


Рис. 5. Переходный процесс нагрева раствора в ванне

Wэп2(s) – ПФ электропривода, Wз2(s) – ПФ задвижки (вместе Wзадт(s), Wэп2(s) и Wз2(s) составляют ПФ исполнительного механизма Wим2), Wт(s) – ПФ нагрева раствора в ванне.

На рис. 5 показан переходный процесс после подстановки значений коэффициентов регуляторов температуры раствора Kptemp и положения задвижки на подаче пара Kpsteam, подобранных с помощью инструмента Sisotool. Таким образом, получилась смоделированная система, являющаяся устойчивой и позволяющая обеспечить нагрев раствора кислоты в ванной без превышения заданного значения. Нагрев раствора на 95 % до заданного уровня раствора кислоты происходит примерно за 18 секунд.

IV. Разработка АСУ ТП

Проектирование АСУ ТП осуществлялось с использованием программного обеспечения Simatic Step 7 версии 5.5. В качестве контроллера в системе использовался центральный процессор CPU 314C-2 PN/DP.

A. Формирование входных и выходных данных

В соответствии с задачами, выполняемыми АСУ ТП, можно сформировать аналоговые и дискретные входы/выходы системы. Их алгоритмические имена отмечены на схеме системы (рис. 1).

В систему передаются 4 аналоговых параметра: температура кислотного раствора в пропиточной ванне (алгоритмическое имя – Temp_soln), давления на паропроводе (P), уровень кислотного раствора в ванне (L_soln) и концентрация кислоты (H2SO4). На выходе системы имеются два аналоговых параметра: положение задвижки на подаче кислотного раствора (V_Steam) и положение задвижки на подаче пара (V_L_soln).

Наличие сигнала об обрыве тканевого полотна на подаче ткани в ванну служит дискетным входом системы (Thread_Breakage), при котором дискретное значение «0» обозначает отсутствие обрыва ткани, а «1» – непосредственно обрыв полотна. Сигнализация, включаемая на панели при обрыве тканевого полотна, служит дискретным выходом системы (Thread_broken_sign).

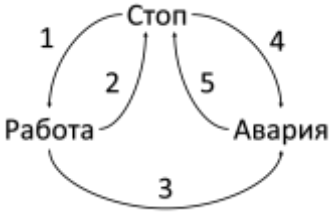


Рис. 6. Схема переходов между режимами системы

B. Формирование режимов работы системы и режимов управления

В системе предусмотрены следующие стандартные режимы: «Стоп», «Работа», «Авария». На рис. 6 представлена схема переходов между режимами с нумерацией возможных событий, способствующих осуществлению данного перехода: 1 – нажатие кнопки «Старт», 2 – нажатие кнопки «Стоп», 3, 4 – поступление критического аварийного сигнала, 5 – устранение причин возникшего аварийного сигнала.

К основным режимам управления исполнительными механизмами можно отнести автоматическое управление (АУ), дистанционное управление (ДУ) и местное управление (МУ). На рис. 7 представлена схема переходов между режимами управления исполнительными механизмами с нумерацией возможных событий, способствующих осуществлению данного перехода: 1 – нажатие кнопки «ДУ» в системе визуализации, 2 – отключения режима «ДУ» (повторное нажатие кнопки «ДУ» в системе визуализации), 3, 4 – включение режима «МУ» с пульта ручного управления, 5 – отключения режима «МУ» с пульта ручного управления.

C. Формирование аварийных/предупредительных сигналов и сообщений

Для извещения оператора о выходе значений параметров системы за допустимые пределы существует система аварийной и предупредительной сигнализации. К аварийным сигналам относятся выход параметров за пределы аварийных значений, отсутствие связи с датчиками, неправильное положение задвижки или ее неисправность, обрыв ткани и др. К предупредительным сигналам относятся выход за пределы рабочих значений параметров или их предела регулирования. Также в системе предусмотрены сигналы, сообщающие об изменениях в состоянии системы или ее элементов. Например, переходы между режимами работы системы или режимами

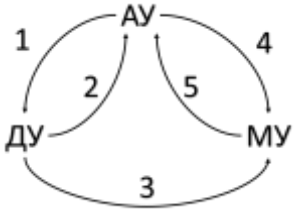


Рис. 7. Схема переходов между режимами управления

Рис. 8. Вывод сообщения об аварийном сигнале

управления задвижками на подаче раствора кислоты или пара. Пример вывода аварийного сигнала, соответствующего превышению верхнего аварийного значения температуры раствора в ванне, представлен на рис. 8.

D. Разработка динамической мнемосхемы

На главном экране системы визуализации, разработанной для АСУ ТП с использованием WinCC flexible, изображена интерактивная мнемосхема рассматриваемого производственного объекта (рис. 9). На данной мнемосхеме присутствуют элементы для отображения входных аналоговых параметров (температура раствора, давление на паропроводе и т. п.), задания выходных аналоговых параметров (положение задвижек), сигнализация о соответствующих выходных дискретных параметрах и индикация при возникновении некоторых аварийных/предупредительных сигналах. Также на мнемосхеме присутствуют кнопки для переключения между режимами управления, а на нижней панели экрана присутствуют кнопки для переключения режимов работы системы («Старт» и «Стоп») и переключения между другими окнами системы визуализации (окно сообщений или окно с графиками входных аналоговых параметров).

V. Заключение

Таким образом, в данном докладе были рассмотрены этапы разработки АСУ ТП обработки ткани кислотным раствором. Первым этапом являлось проведение анализа технологического процесса кислования тканевого полотна и рассмотрение принципа работы пропиточной ванны как

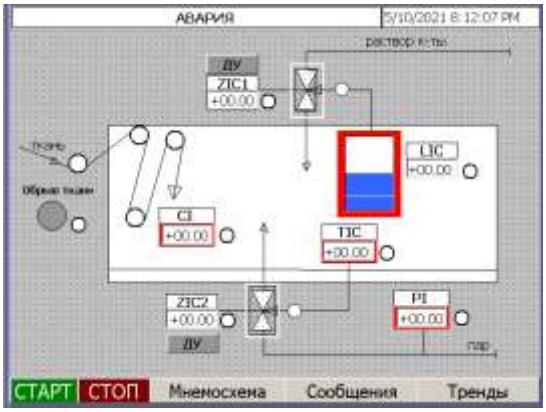


Рис. 9. Главный экран с мнемосхемой

производственного объекта. Второй этап – моделирование основных процессов, происходящих в системе для обеспечения ее работоспособности. Третьим этапом являлась разработка системы визуализации для возможности отображения работы производственного объекта на экране оператора.

Список литературы

[1] Бельцов В.М. Оборудование текстильных отделочных предприятий: Учебник для вузов. /2-е изд. перераб. и доп. ПГУТД. СПб: СПбПГУТД, 2000. 568 с.

[2] Ерофеева Е.В. Автоматизированное проектирование систем и средств управления: метод. указания к выполнению самостоятельной работы для студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Иваново: Иван. гос. хим. -технол. ун-т., 2009. 40 с.

[3] Кричевский Г.Е. Толковый словарь терминов: текстиль и химия: Учебное пособие для вузов. М: Российский институт текстильной и легкой промышленности, 2005. 302 с.

[4] Сажин Б.С., Реутский В.А. Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов. М: Легпромбытиздат, 1990. 224 с.

[5] Шевченко И.К., Развадовская Ю.В. Текстильная промышленность в России: история и современность // Terra Economicus. 2019. № 17(1). С. 131-149.

WWW.VAVILOVSCHOOL.ETU.RU

Кафедра автоматики и процессов управления
197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5, корп.1, пом. 1204
+7 812 234-37-98 Shestopalov_08@mail.ru