Международная Объединенная Академия Наук

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

Научный журнал

Декабрь 2018 г.

НОМЕР 45

ЧАСТЬ 8

Самара 2018

УДК 001.1
ББК 60

Т34

Тенденции развития науки и образования. «Тенденции развития науки и образования» Декабрь 2018 г. №45, Часть 8 Изд. НИЦ «Л-Журнал», 2018. - 68с.

SPLN 001-000001-0389-LJ
DOI 10.18411/lj-12-2018-8
IDSP ljournal-12-2018-8

В выпуске журнала собраны материалы из различных областей научных знаний.

Журнал предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

Все материалы, размещенные в журнале, опубликованы в авторском варианте. Редакция не вносила коррективы в научные статьи. Ответственность за информацию, размещенную в материалах на всеобщее обозрение, несут их авторы.

Информация об опубликованных статьях будет передана в систему ELIBRARY

Электронная версия журнала доступна на сайте научно-издательского центра «Л-Журнал». Сайт центра: ljournal.ru

УДК 001.1
ББК 60

SPLN 001-000001-0389-LJ

<http://ljournal.ru>

Содержание

РАЗДЕЛ XX. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ.....	5
Абдулмажидов Х.А., Матвеев А.С., Абдулмажидов Р.А. Проектирование и расчет вала в программе Inventor Pro	5
Акопян К.А., Власов А.Е., Колодяжный В.В. Исследование электропривода пылепитателя типа УЛПП-2 в среде matlab.....	8
Акопян К.А., Власов А.Е., Колодяжный В.В. Исследование электропривода подачи лоботокарного станка модели МК6713	11
Андрианова Л.П., Кабашов В.Ю., Хайрисламов Д.С. Оценка уровня надежности в сельской распределительной сети с интеллектуальными реклоузерами по индикативным показателям SAIFI И SAIDI	13
Беляев М.М., Попов А.И. Повышение чувствительности расходомеров	19
Бурухина О.В., Сапашева А.Р. Расчет гидравлического сопротивления трубного пространства теплообменного оборудования секции висбрекинга гудрона.....	24
Бурухина О.В., Карпенко Е.В. Повышение эффективности теплообменного оборудования процесса гидрокрекинга	25
Бурухина О.В., Миронова А.А. Выбор теплообменника для процесса гидрокрекинга.....	27
Вавилов В.А. Исследование функционирующей в полумарковской среде RQ-системы с вызываемыми заявками	28
Герасимов А.И., Данзанова Е.В. Способ сварки полимерных толстостенных труб	38
Губайдуллина Р.А. Особенности использования метода аэрофототопографической съемки при деформационном мониторинге	41
Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В. Разработка «цифрового двойника» токарного станка с ЧПУ	44
Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства	50
Кузлякина В.В., Нагаева М.В. Инженерное образование – реальность или виртуальность?	57
Майрансаев З.Р., Чернышев А.Б. Использование функции Грина в импульсных системах управления.....	65
Костенкова Ю.В., Нестеров Ю.Г. Сравнительный анализ протоколов когерентности кэш-памяти мультипроцессорных систем	68

Никитенко Я.А., Доровской В.А. Тяговый электропривод безрельсового городского транспорта в условиях города Керчь.....	74
Никитенко Я.А., Доровской В.А. Быстродействующие обратные связи в системах фазового управления судовыми механизмами.....	78

РАЗДЕЛ XX. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Абдулмажидов Х.А., Матвеев А.С., Абдулмажидов Р.А.
Проектирование и расчет вала в программе Inventor Pro
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева»
(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-12-2018-165

idsp: ljjournal-12-2018-165

Аннотация

В статье представлены основы проектирования валов и их прочностной расчет в системе Inventor Pro. Описаны модули программы Inventor Pro, позволяющие проектировать различные конструкции валов и анализировать их напряженное состояние. Представлены возможности формирования объемных деталей и получения технической документации на изготовление валов. Рассмотрены возможности получения сечений местных разрезов и выбора подшипников для валов.

Ключевые слова: механические передачи, валы, оси, передаточное число, нагрузки в зубчатом зацеплении, проектирование зубчатого зацепления в системе Inventor Pro, прочностной расчет вала.

Abstract

The article presents the principles of design and their calculation of Inventor Pro system. Describes the modules Inventor Pro, which will help you to design various designs and analyze their stress state. Features of formation of voluminous details and obtain technical documentation for manufacturing of shafts. Considered the possibility of obtaining sections of local incisions and choice of bearings for shafts.

Keywords: mechanical transmission, shafts, axles, gear ratio, load the spline is, designing gearing system Inventor Pro, calculation of the shaft.

Важным элементом механической передачи или редуктора является вал, который воспринимает нормальную нагрузку и, в отличие от оси, передает вращающий момент. В качестве опор вала применяются подшипники, конструкции которых выбираются в зависимости от возникающих детали нагрузок. Для вала прямозубой передачи выбираются радиальные подшипники, воспринимающие нормальные нагрузки и вращающий момент, а для вала косозубой передачи вследствие возникновения осевых нагрузок выбирают радиально-упорные. Радиальные подшипники могут работать при определенных осевых нагрузках, однако при их значительных величинах следует применять радиально-упорные. В зависимости от назначения передачи конструкции валов могут быть различны. Существуют валы гибкие, прямые, ступенчатые и коленчатые. Вал, изготавливаемый заодно с зубчатым колесом, называется вал-шестерней. Обычно вал-шестерня является ведущим элементом передачи, а в качестве ведомого элемента выступает вал, на который насажено зубчатое колесо. Диаметр ведомого вала обычно больше диаметра ведущего. В предварительном расчете диаметр выходного конца вала редуктора определяется исходя из соотношения крутящего момента T к полярному моменту сопротивления кручению W по формуле:

$$d = \sqrt[3]{\frac{T}{0,2 \cdot [\tau]}}, \quad (1)$$

где T – крутящий момент, Н·м, $[\tau]$ – допускаемые касательные напряжения, Н/мм². При этом действующие значения напряжений должны быть меньше допускаемых значений $[\tau]$. Величины диаметров других участков ступенчатого вала определяются исходя из конструктивных особенностей детали, к примеру, диаметр участка вала под подшипник должен быть кратным 5, поскольку стандартные подшипники изготавливаются с внутренними диаметрами с соответствующим шагом.

В деталях машин, находящихся под нагрузкой, обычно возникают два вида напряжений: нормальные σ и касательные τ . Нормальные напряжения в свою очередь можно рассматривать как сумму напряжений сжатия $\sigma_{сж}$ и напряжений изгиба $\sigma_{изг}$. По правилам прочностного расчета действующие в детали напряжения должны быть меньше допускаемых значений, которые приводятся в справочной литературе. Особенностью вала является то, что в процессе работы в нем возникают все три вида напряжений вследствие действия сил сжатия, изгиба и кручения. В таких случаях при расчете на прочность нужно определять, кроме частных случаев напряжений сжатия, изгиба и кручения, и эквивалентные напряжения с последующим сравнением их с допускаемыми значениями [1, 2].

Программа Inventor Pro обладает специальным модулем, позволяющим проектировать твердотельные объемные валы различных конструкций, получать техническую документацию на их изготовление, выполнять стандартные элементы на валах (как элементы резьбы, шпоночные канавки, фаски, сопряжения, внутренние отверстия и т.д.). Кроме того, существует возможность проведения анализа напряжений с учетом всех действующих нагрузок, вращающих моментов и реакций опор. Также с помощью методов ассоциативного черчения можно получать различные виды, изометрические представления, местные разрезы и сечения. Важной опцией в проектировании валов в системе Inventor Pro является определение массы, объема и масс-инерционных характеристик детали, которые необходимы при проведении анализа напряжений [2, 3].

Генератор вала в программе Inventor Pro позволяет в выбранном стандарте создавать участки вала с определенным диаметром и длиной. Участки вала могут быть с круглым или квадратным сечением, также модуль позволяет создавать конические участки.

Вкладка «Расчет» генератора вала предназначена для проведения прочностного расчета вала по значениям параметров, заданным пользователем. Для задания материала вала, нагрузок и моментов на нем, необходимо выяснить в каких условиях и в какой механической передаче будет работать вал.

При проведении расчета на прочность вала, спроектированного в системе Inventor Pro, необходимо задать материал, добавить опоры и нагрузки с учетом того как в реальных условиях будет работать вал. Опоры на расчетной схеме в Inventor Pro обычно отображаются треугольниками, а нагрузки стрелками. Треугольники, обозначающие опоры могут быть с чертой для задания в этом месте осевой нагрузки. После того как заданы все нагрузки и опоры выполняется прочностной расчет. Результатами прочностного расчета являются множество таблиц и гистограмм на основе которых исследователь интерпретирует данные и делает выводы о возможности применения спроектированного вала в данных конкретных условиях эксплуатации [4, 5]. Наиболее важным показателем в этом смысле является запас прочности, который, к примеру, для стали, обычно находится в пределах от 1,5 до 2 единиц.

На рисунке 1 представлен ведомый, тихоходный вал одноступенчатого цилиндрического редуктора выполненный инструментами генератора вала в системе Inventor Pro. Вал имеет 5 участков, причем, первым, по формуле (1), определяется диаметр выходного конца с шпоночной канавкой и с учетом влияния изгиба от консольной нагрузки со стороны звездочки последующей цепной передачи при допустимых касательных напряжениях $[\tau] = 20$ Н/мм². Полученное значение диаметра

вала округляется до ближайшего из стандартного ряда. Диаметры остальных участков вала назначаются из конструктивных соображений при формировании редуктора [6, 7].

Рисунок 1. Ведомый вал одноступенчатого редуктора, выполненный в системе Inventor Pro

Второй участок вала рассчитан под подшипник соответствующего диаметра, далее следует участок с шпоночной канавкой под зубчатое колесо. Затем следует буртик, предотвращающий осевое смещение колеса на валу. Последней частью вала является участок под второй подшипник. На рисунке 2 представлен расчет ведомого (тихоходного) вала цилиндрического редуктора.

Рисунок 2. Расчет ведомого вала цилиндрического редуктора в системе Inventor Pro (определение напряжений при кручении)

При расчете вала определены реакции опор, нагрузки, действующие в соответствующих точках в виде нормальных и касательных сил со стороны зубчатого колеса и консольной нагрузки со стороны звездочки цепной передачи. По рисунку 2 видно, что для вала, изготовленного из стали напряжения кручения возникают между плоскостями приложения крутящих моментов. Выявлены значения напряжений изгиба, а также определено предельное напряжение. Концентрацию напряжений вызывает

наличие шпоночной канавки. Для рассматриваемого вала действующие напряжения находятся в допустимых пределах.

***

1. Абдулмажидов, Х.А. Обоснование основных параметров и режимов работы ковшовых каналоочистительных машин для зоны осушения. – Дис. канд. техн. наук. – М.: МГУП, 2000 г.
2. Абдулмажидов, Х.А. Комплексное проектирование и прочностные расчеты конструкций машин природообустройства в системе Inventor Pro / Х.А. Абдулмажидов, А.С. Матвеев // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2016. № 2 (72). С. 40-46.
3. Абдулмажидов, Х.А. Совершенствование рабочего оборудования каналоочистителя РР-303. Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2011. №2 (47). – С. 58-60.
4. Абдулмажидов, Х.А. Уточненные прочностные расчеты рабочих органов машин природообустройства в системе Inventor Pro / Х.А. Абдулмажидов, А.С. Матвеев // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 3. С. 7-14.
5. Абдулмажидов, Х.А. Уточненный прочностной расчет элементов машин методом конечных элементов в системе Inventor Pro / Х.А. Абдулмажидов // Тенденции развития науки и образования. 2018. Т. 39. № 3. С. 27-30.
6. Абдулмажидов, Х.А. Основные задачи конструирования и возможности компьютерных программ при проектировании элементов наземных машин / Абдулмажидов Х.А. // Тенденции развития науки и образования. 2018. Т. 42. № 3. С. 43-45.
7. Абдулмажидов, Х.А. Трехмерное моделирование элементов машин природообустройства в системе "AUTOCAD" / Х.А. Абдулмажидов // Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 280100 М-во сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВПО Московский гос. ун-т природообустройства. Москва, 2012.

Акопян К.А., Власов А.Е., Колодяжный В.В.

Исследование электропривода пылепитателя типа УЛПП-2 в среде matlab

*Южно-Российский Государственный Политехнический Университет
(Россия, Новочеркасск)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-166

idsp: ljjournal-12-2018-166

Аннотация

Приведен пример моделирования реостатного пуска электропривода постоянного тока пылепитателя типа УЛПП-2, в среде Matlab, показаны переходные процессы скорости вращения ротора, электромагнитного момента и тока якоря.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, реостатный пуск, электропривод типа «ПБ-52», пылепитатель типа УЛПП-2, Matlab.

Существующее технологическое оборудование в последнее время подвергается капитальной реконструкции с целью интенсификации проводимых в нем процессов, повышения его мощности, снижения энергопотребления, что приводит во многих случаях к перегрузке пылеулавливающего оборудования и, как следствие, к повышенному выбросу пыли. Применение ранее использовавшихся пылеприготовительных устройств становится неэффективным, из-за чего возникает необходимость в их замене на актуальные разработки.

Основным компонентом, подлежащим к замене, является электропривод пылепитателей. Расширение диапазона регулирования скоростей электроприводов пылепитателей, повысит точность регулирования и уменьшит разбежки скоростей пылепитателей, что улучшит топочный процесс.

Большими возможностями для исследования работы асинхронного двигателя обладает пакет Matlab с приложениями Simulink и SimPowerSystems, имеющий библиотеки виртуальных электрических машин, силовой электроники, источников энергии, измерительных приборов.

Питатели УЛПП-2 предназначены для регулирования количества подаваемой в топку пыли и регулирования паровой производительности котла. Пылепитатели установлены под бункером пыли и приводятся во вращение электродвигателем постоянного тока типа «ПБ-52». Внешний вид двигателя постоянного тока типа «ПБ-52» представлен на рисунке 1.

Рисунок 1 Двигатель постоянного тока типа «ПБ-52».

Большими возможностями для исследования работы двигателя постоянного тока обладает пакет Matlab с приложениями Simulink и SimPowerSystems, имеющий библиотеки виртуальных электрических машин, силовой электроники, источников энергии, измерительных приборов

Рассмотрим пример моделирования процесса реостатного пуска ДПТ НВ типа «ПБ-52» со следующими параметрами (скорость вращения ротора 1500 об/мин, мощность двигателя 2,4 кВт, напряжение питания – 220 В) исследуемой установки на компьютерной модели, созданной в пакете Matlab (рисунок 2).

Рисунок 2 – Компьютерная модель в пакете Matlab

Функционально модель реостатного пуска привода состоит из пускового реостата (разгон), ДПТ НВ DC Machine. Блок разгон состоит из трех сопротивлений которые включаются последовательно в разные моменты времени что обеспечивает пуск двигателя в три ступени. Структура блока «разгон» представлена на рисунке 3.

Рисунок 3 – Структура блока «разгон»

В ходе моделирования получены осциллограммы тока якоря, электромагнитного момента, и скорости вращения ротора, представленные на рисунке 4.

Рисунок 4 – Осциллограммы: а) электромагнитного момента, б) скорость вращения ротора, в) ток якоря.

В результате моделирования реостатного пуска ДПТ НВ типа «ПБ-52» были получены следующие данные переходных процессов: время разгона двигателя $t_{пп}=2.1$ с, максимальное значение пускового тока $I_{пм}=19$ А, который является допустимым для данного электродвигателя, изменение знака электромагнитного момента не наблюдается.

***

1. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание // И. В. Черных, 2007. – 288 с.
2. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т. 1 / Под общей ред. И.П. Копылова, Б. К. Ключева – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
3. Потемкин В.Г., Рудаков П.И. MatLAB для студентов. – 2-е изд. испр. и дополн. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 448 с.

Акопян К.А., Власов А.Е., Колодяжный В.В.

Исследование электропривода подачи лоботокарного станка модели МК6713*Южно-Российский Государственный Политехнический Университет
(Россия, Новочеркасск)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-167

idsp: ljjournal-12-2018-167

Аннотация

Приведен пример моделирования пуска асинхронного двигателя модели «RA132MB6» с тиристорным преобразователем в среде Matlab, показаны переходные процессы скорости вращения ротора и электромагнитного момента.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь, электропривод модели «RA132MB6», Лоботокарный станок модели МК6713, Matlab.

Лоботокарный станок модели МК 6713 с программным управлением, широко используется для токарной обработки деталей типа колец, фланцев дисков различной конфигурации в замкнутом полуавтоматическом цикле по программе. Предусмотрена возможность нарезания крепежных резьб. Областью применения станка являются индивидуальное, мелкосерийное производство с мелкими повторяющимися партиями деталей. Общий вид лоботокарного станка МК 6713 представлен на рисунке 1

Рисунок 1 лоботокарный станок МК 6713

Для данного токарного станка используется асинхронный электропривод с короткозамкнутым ротором модели «RA132MB6».

Большими возможностями для исследования работы асинхронного двигателя обладает пакет Matlab с приложениями Simulink и SimPowerSystems, имеющий библиотеки виртуальных электрических машин, силовой электроники, источников энергии, измерительных приборов

Рассмотрим пример моделирования процесса пуска асинхронного двигателя модели «RA132MB6» с устройством плавного пуска со следующими параметрами (скорость вращения ротора 950 об/мин, мощность двигателя 5.5 кВт, напряжение питания – 380 В) исследуемой установки на компьютерной модели, созданной в пакете Matlab (рисунок 2).

Рисунок 2 – Компьютерная модель в пакете Matlab

Данная модель состоит из, асинхронного двигателя (RA132MB6), блока «устройство плавного пуска» и источника трехфазного напряжения. Блок «устройство плавного пуска» плавно увеличивает напряжения тем самым ограничивая ток в момент пуска

Структура блока представлена на рисунке 3.

Рисунок 3 – Структура блока «устройство плавного пуска»

В ходе моделирования получены осциллограммы, электромагнитного момента, и скорости вращения ротора, представленные на рисунке 4.

Рисунок 4 – Осциллограммы: а) электромагнитный момент, б) скорость вращения ротора

В результате моделирования асинхронного двигателя модели «RA132MB6» с устройством плавного пуска были получены следующие данные переходных процессов: время пуска двигателя $t_{п}=6$ с, изменение знака электромагнитного момента не наблюдается.

***

1. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание // И. В. Черных, 2007. – 288 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, - 320 с.
3. Сандлер А.С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков. Учеб. Пособие для вузов. М., «Высшая школа», 1972. - 440 с.

Андрианова Л.П., Кабашов В.Ю., Хайрисламов Д.С.

Оценка уровня надежности в сельской распределительной сети с интеллектуальными реклоузерами по индикативным показателям SAIFI и SAIDI

*Баширский государственный аграрный университет
(Россия, Уфа)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-168

idsp: ljjournal-12-2018-168

Аннотация

Реклоузер — устройство автоматического управления и защиты воздушных ЛЭП на основе вакуумных выключателей под управлением специализированного микропроцессора. В статье рассмотрена методика определения уровня надежности кольцевого фидера с интеллектуальными реклоузерами в сельской воздушной электрической сети 6-35 кВ по индикативным показателям SAIFI и SAIDI.

Ключевые слова: Сельские распределительные сети, кольцевой фидер, секционирующие реклоузеры, надежность электроснабжения, индикативные показатели.

Низкая надежность электроснабжения сельских потребителей, наличие участков, проходящих в лесистой местности, частые повреждения и длительное время их поиска в воздушных распределительных электрических сетях среднего класса напряжений (6, 10, 20, 35 кВ), обуславливают необходимость перехода к сетям нового технологического уклада с качественно новыми характеристиками надежности, эффективности, доступности и управляемости [1, 2, 3].

В соответствии с положением ПАО «Россети» «Об единой технической политике в электросетевом комплексе» программой инновационного развития электросетевого комплекса предусматривается внедрение в сетях среднего класса напряжений перспективных технологий на основе интеллектуальных коммутационных аппаратов - реклоузеров с интегрированными контроллерами присоединений и возможностью интеграции в единую информационную систему управления, максимально в идеологии Plug and Play [1, 2].

При внедрении интеллектуальных коммутационных аппаратов - реклоузеров приоритет следует отдавать решениям по распределенной (или децентрализованной) автоматизации сети, предполагающей создание кольцевых фидеров с однократным автоматическим резервированием и автоматическим секционированием магистрали [1].

Распределенная автоматизация аварийных режимов работы сетей основана на принципах автоматического секционирования и резервирования воздушных линий электропередачи. Каждый отдельный секционирующий аппарат является интеллектуальным устройством, которое анализирует режимы работы электрической сети и автоматически производит ее реконфигурацию в аварийных режимах, т.е. локализацию

места повреждения и восстановление электроснабжения потребителей на неповрежденных участках сети.

Эффект достигается за счет сокращения количества отключений потребителей при неустойчивых повреждениях, автоматизации процесса локализации поврежденного участка, применения полностью необслуживаемого оборудования.

Повышение надежности электроснабжения сельских распределительных сетей 6-35 кВ, оснащенных секционирующими реклоузерами - выключателями, обеспечивается за счет [5, 6,]:

- секционирования сети, что позволяет локализовать поврежденные участки, сохраняя при этом электроснабжение остальных потребителей питающего фидера и подавая питание на неповрежденный участок от резервного источника питания;
- сокращения времени обслуживания, ремонта, так как секционирование сети позволяет уменьшить время определения поврежденного участка фидера и его локализацию;
- наблюдаемости сети с помощью автоматизированных информационно-измерительных систем контроля качества и учета электроэнергии, мониторинга параметров ЛЭП, автоматизации учёта отключений и формирования статистики повреждений и пр.;
- управляемости сети путем управления отдельными коммутационными аппаратами и ведения режима сети дистанционно из SCADA системы и по месту [1].

В соответствии с приказами Министерства энергетики РФ [2, 3] оценка уровня надежности и качества электроснабжения распределительной сети осуществляется по индикативным показателям надежности (SAIFI и SAIDI).

Показатель надежности SAIFI – (System Average Interruption Frequency Index – средняя частота появления повреждений в системе) – характеризует среднее количество отключений потребителей в год, [откл. / год],[6]

$$SAIFI = \sum(\omega_i \cdot N_i) / \sum N_i, (1)$$

где ω_i – количество отключений потребителей i -го участка фидера, откл./год;

N_i – количество потребителей i -го участка фидера, шт.;

i – количество участков фидера, шт.,

$$\omega_i = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{ну}}) \cdot L_i, (2)$$

где ω_0 – удельная частота повреждений на 100 км линии, откл./год;

$k_{\text{ну}}$ – коэффициент, учитывающий наличие многократных АПВ на устранение неустойчивых повреждений в сети: $k_{\text{ну}} = 0$ при отсутствии АПВ;

$k_{\text{ну}} = 0,6$ при наличии однократного АПВ; $k_{\text{ну}} = 0,8$ при наличии двукратного АПВ;

L_i – суммарная длина участков фидера, при повреждении на которых происходит отключение потребителей i -го участка, км;

$$\omega_0 = n_{\text{откл}} \cdot 100 / L, (3)$$

где $n_{\text{откл}}$ – количество отключений фидера в год, откл./год;

L – длина линии, км.

Показатель надежности SAIDI – (System Average Interruption Duration Index – средняя продолжительность отключения) – характеризует в среднем продолжительность одного отключения в системе в год, [ч / год] [6]

$$SAIDI = \sum(T_i \cdot N_i) / \sum N_i, (4)$$

где T_i – время перерыва электроснабжения потребителей i -го участка фидера, ч/год,

$$T_i = \omega_i \cdot T \cdot k_{\text{вв}}, (5)$$

где T – среднее время восстановления одного устойчивого повреждения, ч;

$k_{\text{вв}}$ – коэффициент, учитывающий влияние сокращения зоны поиска поврежденного участка за счет секционирования на общее время восстановления электроснабжения, при наличии автоматических пунктов секционирования принимается равным $k_{\text{вв}} = 0,6$.

$$T = T_{\text{пер.}} \cdot n_{\text{откл.}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{пер.}}$ – общее время перерыва электроснабжения при аварийных отключениях фидера, [ч/год];

$n_{\text{откл.}}$ – количество аварийных отключений фидера, приводящих к перерыву электроснабжения, [откл./год].

Выбор мест установки интеллектуальных реклоузеров осуществляется по критерию минимального значения показателя *SAIFI*. Минимальное значение *SAIFI* достигается при равенстве произведения количества потребителей (N) на протяжённость фидера (L) со всеми отпайками на каждом из участков сети [5].

$$N_i \cdot L_i \approx \text{const}, \quad (7)$$

где N_i – количество потребителей, подключённых к участку i ;

L_i – суммарная протяжённость фидера с отпайками на участке i , км.

Методика определения уровня надежности сети по индикативным показателям *SAIFI* и *SAIDI* до и после установки секционирующих реклоузеров показана на примере кольцевого фидера.

С целью повышения надежности электроснабжения потребителей предусматривается установка секционирующих реклоузеров и организация двукратного автоматического повторного включения (АПВ) и защиты минимального напряжения (ЗМН) на головных выключателях кольцевого фидера [5, 6].

Рисунок 1. Схема кольцевого фидера до установки реклоузеров:
 №1, №4, №5 – номера потребителей линии 1 от подстанции 1;
 №2, №3, №6 – номера отпайки линии 2 от подстанции 2

Схемы кольцевого фидера до и после установки реклоузеров приведены соответственно на рисунках 1 и 2.

Рисунок 2. Схема кольцевого фидера после установки реклоузеров:
 R1, R2, R3 – реклоузеры

В таблице 1 указаны длины участков фидера, номера и количество потребителей, получающих питание от подстанций 1 и 2.

Таблица 1.

Длины участков, номера и число потребителей на участках

Номер участка, номера потребителей	Количество потребителей, N , шт,	Длина участка, км
1, №4	$N_1 = 6$	$L_1 = 1,5 + 0,5 + 2,0 = 4$
2, №1, №5	$N_2 = 1 + 2 = 3$	$L_2 = 0,5 + 4,5 + 1,5 + 0,5 = 7$
3, №2	$N_3 = 20$	$L_3 = 0,5$
4, №3, №6	$N_4 = 1 + 5 = 6$	$L_4 = 1,0 + 2,0 + 2,5 + 0,5 + 3,5 = 9,5$
	$N_{\Sigma} = 35$	$L_{\Sigma} = 20$

Исходными данными для расчета показателей надежности $SAIFI$ и $SAIDI$ являются: удельная частота повреждений на 100 км линии в год, откл., среднее время восстановления одного устойчивого повреждения, ч, и наличие АПВ на головном выключателе (таблица 2).

Таблица 2.

Исходные данные для расчета

Фидер	Удельная частота повреждений на 100 км линии в год, откл.	Среднее время восстановления одного устойчивого повреждения, ч	АПВ на головном выключателе
1	24	6	однократное
2	37	6	отсутствует

Для расчета показателей надежности фидер разбит на участки 1, 2, 3, 4, как показано на рисунке 3.

Рисунок 3. Схема кольцевого фидера с разделением на участки 1-4

Расчет величин ω_i и T_i до и после установки реклоузеров проведен с использованием соответствующих расчетных соотношений (2), (3) и (5), (6) с учетом длин участков фидера в соответствии с рисунком 3.

Результаты расчета количества и длительности отключений на участках фидера до и после установки реклоузеров приведены соответственно в таблицах 3 и 4.

Таблица 3.

Количество и длительность отключений на участках фидера до установки реклоузеров

Количество отключений на участках фидера, ω_i откл./год		Длительность отключений на участках фидера, T_i ч./год	
Расчетная формула	Результат	Расчетная формула	Результат
$\omega_1 = \omega_2 = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{нy}}) \cdot (L_1 + L_2),$ где $\omega_0 = 24$; $k_{\text{нy}} = 0,6$; $L_1 + L_2 = 11$	$\omega_1 = \omega_2 = 1,06$	$T_1 = \omega_1 \cdot T \cdot k_{\text{вв}};$ $T_2 = T_1,$ где $\omega_1 = \omega_2 = 1,06$; $T = 6, k_{\text{вв}} = 1;$	$T_1 = T_2 = 6,4$
$\omega_3 = \omega_4 = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{нy}}) \cdot (L_3 + L_4),$ где $\omega_0 = 37$; $k_{\text{нy}} = 0$; $L_3 + L_4 = 10$	$\omega_3 = \omega_4 = 3,7$	$T_3 = \omega_3 \cdot T \cdot k_{\text{вв}};$ $T_4 = T_3,$ где $\omega_3 = \omega_4 = 3,7$; $T = 6, k_{\text{вв}} = 1;$	$T_3 = T_4 = 22,2$

Таблица 4.

Количество и длительность отключений на участках фидера после установки реклоузеров

Количество отключений на участках фидера, ω_i откл./год		Длительность отключений на участках фидера, T_i ч./год	
Расчетная формула	Результат	Расчетная формула	Результат
$\omega_1 = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{нy}}) \cdot L_1,$ $\omega_0 = 24$; $k_{\text{нy}} = 0,8$; $L_1 = 4$	$\omega_1 = 0,19$	$T_1 = \omega_1 \cdot T \cdot k_{\text{вв}};$ $\omega_1 = 0,19$; $T = 6$; $k_{\text{вв}} = 0,6$	$T_1 = 0,7$
$\omega_2 = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{нy}}) \cdot L_2,$ $\omega_0 = 24$; $k_{\text{нy}} = 0,8$; $L_2 = 7$	$\omega_2 = 0,34$	$T_2 = \omega_2 \cdot T \cdot k_{\text{вв}};$ $\omega_2 = 0,34$; $T = 6$; $k_{\text{вв}} = 0,6$	$T_2 = 1,2$
$\omega_3 = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{нy}}) \cdot L_3,$ $\omega_0 = 37$; $k_{\text{нy}} = 0,8$; $L_3 = 0,5$	$\omega_3 = 0,04$	$T_3 = \omega_3 \cdot T \cdot k_{\text{вв}};$ $\omega_3 = 0,04$; $T = 6$; $k_{\text{вв}} = 0,6$	$T_3 = 0,01$
$\omega_4 = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{нy}}) \cdot L_4,$ $\omega_0 = 37$; $k_{\text{нy}} = 0,8$; $L_4 = 9,5$	$\omega_4 = 0,7$	$T_4 = \omega_4 \cdot T \cdot k_{\text{вв}};$ $\omega_4 = 0,7$; $T = 6$; $k_{\text{вв}} = 0,6$	$T_4 = 2,5$

Обоснование выбора коэффициентов $k_{\text{нy}}$ и $k_{\text{вв}}$ при расчетах величин ω_i и T_i до установки реклоузеров:

- на участках 1 и 2 $k_{\text{нy}} = 0,6$, т.к. на головном выключателе имеется однократное АПВ и по статистике снижающее количество отключений потребителей при неустойчивых повреждениях на 60%;
- на участках 3 и 4 коэффициент $k_{\text{нy}} = 0$, т.к. на головном выключателе отсутствует АПВ;
- коэффициент $k_{\text{вв}} = 1$ в связи с отсутствием секционирования [5].

Обоснование выбора коэффициентов $k_{\text{нy}}$ и $k_{\text{вв}}$ при расчетах величин ω_i и T_i после установки реклоузеров:

- коэффициент $k_{\text{нy}} = 0,8$, т.к. на головном выключателе и реклоузерах имеется двукратное АПВ и по статистике снижающее количество отключений потребителей при неустойчивых повреждениях на 80% [5];
- коэффициент $k_{\text{вв}} = 0,6$ в связи с сокращением зоны поиска поврежденного участка за счет секционирования.

Результаты расчета результирующего уровня надежности по показателям *SAIFI* и *SAIDI* кольцевого фидера до и после установки реклоузеров приведены соответственно в таблицах 5, 6.

Расчет показателей *SAIFI* и *SAIDI* проведен на основе соотношений (4) и (5).

Таблица 5.

Показатели уровня надежности фидера без реклоузеров

Показатель <i>SAIFI</i> , откл./год	
Расчетная формула	Результат, откл./год
$SAIFI = \sum(\omega_i \cdot N_i) / N_{\Sigma}$, где $\sum \omega_i \cdot N_i = 105,76$; $N_{\Sigma} = 35$	$SAIFI = 3,02$
Показатель <i>SAIDI</i> , ч./год	
Расчетная формула	Результат, ч/год
$SAIDI = \sum(T_i \cdot N_i) / N_{\Sigma}$, где $\sum(T_i \cdot N_i) = 634,8$; $N_{\Sigma} = 35$	18,1

Таблица 6.

Показатели уровня надежности фидера с реклоузерами

Показатель <i>SAIFI</i> , откл./год	
Расчетная формула	Результат, откл./год
$SAIFI = \sum(\omega_i \cdot N_i) / N_{\Sigma}$, $\sum \omega_i \cdot N_i = 7,16$; $N_{\Sigma} = 35$	$SAIFI = 0,2$
Показатель <i>SAIDI</i> , ч./год	
Расчетная формула	Результат, ч/год
$SAIDI = \sum(T_i \cdot N_i) / N_{\Sigma}$, $\sum(T_i \cdot N_i) = 24,8$; $N_{\Sigma} = 35$	0,7

Результаты для сравнительного анализа показателей надежности *SAIFI* и *SAIDI* кольцевого фидера до и после установки реклоузеров приведены в таблице 7.

Таблица 7.

*Сравнительный анализ показателей *SAIFI* и *SAIDI* фидера до и после установки реклоузеров*

Показатели <i>SAIFI</i> Количество отключений потребителей, откл. / год		Показатели <i>SAIDI</i> Длительность отключений потребителей, ч / год	
до установки реклоузера	после установки реклоузера	до установки реклоузера	после установки реклоузера
3,02	0,2	18,1	0,7

Таким образом, после установки секционирующих реклоузеров в кольцевом фидере отмечается значительное снижение индикативных показателей *SAIFI* и *SAIDI*, на 2,78 откл. / год и 17, 4ч / год соответственно. Полученные данные свидетельствуют о значительном снижении количества и длительности перерывов электроснабжения потребителей в 15 и 18 раз соответственно.

Выводы

1. Применение в распределительных сетях 6-35 кВ интеллектуальных секционирующих устройств – реклоузеров направлено на обеспечение децентрализованной автоматизации управляемости сети, повышение надежности и качества электроснабжения без проведения традиционной реконструкции фидеров.

2. Секционирующие устройства – реклоузеры целесообразно использовать в сети для организации АВР и АПВ, защиты минимального напряжения, максимальной токовой защиты, защиты от однофазных замыканий на землю, подключения новых потребителей.

3. Оценка уровня надежности и качества электроснабжения распределительной сети осуществляется по индикативным показателям *SAIFI* и *SAIDI*, характеризующим соответственно количество и длительность отключений в сети за рассматриваемый период.

4. После определения показателя *SAIFI* место размещения реклоузеров в распределительной сети корректируется в соответствии с требованиями ПУЭ [4]: по условиям близости к дорогам, по условию отсутствия связи, по условиям неравномерности распределения потребителей по фидеру [5, 7].

***

1. Андрианова Людмила Прокопьевна, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и применения электрической энергии в сельском хозяйстве ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. Тел.: 8-917-4981104, e-mail : alp3003@yandex.ru.

2. Кабашов Владимир Юрьевич, доктор технических наук, доцент кафедры безопасности и жизнедеятельности ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. Тел.: 8-905-0079812, e-mail: kabashov@bk.ru.
3. Хайрисламов Данил Сулейманович, аспирант кафедры электроснабжения и применения электрической энергии в сельском хозяйстве ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. Тел.: 7(937) 3691330, e-mail: hairislamow2014@yandex.ru

Беляев М.М., Попов А.И.

Повышение чувствительности расходомеров

*ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-169

idsp: ljjournal-12-2018-169

Аннотация

В статье рассматривается возможность понижения порога чувствительности расходомера за счет искусственного усиления расхода потока, проходящего через расходомер. Для этого исследовалась работа расходомера во встречно-параллельной схеме с отрицательной обратной связью.

Ключевые слова: расходомер, объемный расход газа, поток реверса, диапазон измерения.

Введение

Расходомеры текучих сред, например на базе струйного генератора [1] обладают рядом преимуществ (частотный выход, нет подвижных частей, не создает в зоне измерения взрыво-пожароопасность...), но уступает не струйным по порогу срабатывания [2] в силу того, что колебания струи генератора не возбуждаются при малой скорости измеряемого потока. Поэтому в статье рассмотрено снижение порога чувствительности на примере струйного расходомера.

Постановка задачи.

Рассматривается возможность понижения порога чувствительности струйного расходомера за счет искусственного усиления расхода потока, проходящего через генератор. Для этого исследовалась работа струйного расходомера во встречно-параллельной схеме с отрицательной обратной связью. При этом часть потока, проходящего через генератор, возвращалась в магистраль измеряемого потока.

Ранее было исследовано подобное решение измерения с возвратом части потока по обратному каналу назад в магистраль (до расходомера) и расходомерами в прямом и обратном каналах [3]. Это исследование показало, что положительный результат измерения малых расходов с приемлемыми погрешностями измерения достигается в узкой зоне.

Рис. 1- Схема измерения расхода с циркуляцией обратного потока

Решение

Решение, которое представлено в статье, позволяет за счет снижения порога чувствительности заметно расширить диапазон измерения.

Схема такого измерителя расхода текучих сред показана на рис. 1.

Измеряемый поток $Q_{\text{изм}}$ проходит по прямому каналу 1 через струйный генератор 2 к выходу 3 расходомера. По обратному каналу 4 циркулирует поток $Q_{\text{цир}}$, создаваемый побудителем потока циркуляции 5. Отрицательная обратная связь 6 соединяет пневмоэлектрический преобразователь 7 генератора 2 с управляемым источником частотного питания 8 побудителя потока 5. Источник питания 8 содержит задатчик начального расхода $Q_{\text{цир}}$ при измеряемом расходе $Q_{\text{изм}}$ равном нулю. Поток циркуляции, проходящий через струйный генератор активизирует (обеспечивает колебания его струи) и позволяет измерять расход практически от нуля. При возрастании расхода измеряемого потока $Q_{\text{изм}}$ поток циркуляции $Q_{\text{цир}}$ уменьшается на ту же величину уменьшением производительности побудителя потока 5, из-за уменьшения частоты его питания в соответствии с изменением величины сигнала обратной связи 6. При достижении измеряемым потоком $Q_{\text{изм}}$ естественного порога чувствительности самого струйного генератора 2 источник питания 8 побудителя потока 5 отключается и обратная связь 6 перестает действовать, после чего измерение расхода продолжается генератором 2 самостоятельно.

На рис.2 показана структурная схема управляемого отрицательной обратной связью источника питания побудителя потока, обеспечивающая работу такого расходомера.

Рис. 2 - Структурная схема расходомера с переменной скоростью потока циркуляции

Следящая система управления активизируется при включении крана 14 подачи текучей среды сигналом разблокировки побудителя потока 5. Сигнал отрицательной обратной связи 6 проходит от пневмоэлектрического преобразователя 7 по электрическим цепям через блок сравнения 10 и интегратор 11 к побудителю потока 5 и далее по каналу 4 ко входу генератора 2. В блоке сравнения 10 вычисляется разность Δf_1 выходной частоты генератора $f_{\text{ген}}$ и изменяющейся частоты источника питания 8 с уставкой $f_{\text{зад}}$ начальной частоты 9 ($\Delta f_1 = f_{\text{ген}} - f_{\text{зад}}$). В интеграторе 11 вырабатывается частотное питание побудителя потока 5 циркуляции $Q_{\text{цир}}$ величиной обратно пропорционально величине $Q_{\text{изм}}$. При достижении потоком $Q_{\text{изм}}$ расхода, равного естественному порогу чувствительности $Q_{\text{епч}}$ генератора 3 величина частотного питания побудителя потока из интегратора 11 с инвертором знака 12 приходит к нулю и побудитель потока останавливается, блокируется и не работает во второй основной части диапазона измерения. Таким образом, разность частот из блока сравнения 10 следящей системы поддерживает постоянство расходов измеряемого и циркуляционного потоков ($Q_{\text{изм}} + Q_{\text{цир}}$), проходящих через генератор 3 и подает сигнал в интегратор при отклонении разности $f \pm \Delta f = f_{\text{ген}} - f_{\text{зад}}$ от нуля.

Измеренный поток $Q_{\text{изм}}$ подается на выход 3 расходомера к потребителю и отображается по частоте $f_{\text{изм}}$ индикатором 13.

На характеристике струйного расходомера с расширенным диапазоном измерения, за счет понижение его порога чувствительности (рис.3), показано, что до естественного порога чувствительности самого струйного генератора $Q_{\text{епч}}$ через генератор проходит поток, состоящий из двух частей: возрастающего потока $Q_{\text{изм}}$ и обратно-пропорционального ему падающего по расходу потока $Q_{\text{цир}}$, сумма которых, выраженная в частоте $f_{\text{изм}} + f_{\text{цир}}$ неизменна и задается в соответствии с уровнем естественного порога чувствительности самого генератора (горизонтальная линия на рис. 3).

Рис.3– Характеристика струйного расходомера с расширенным диапазоном измерения

После достижения $Q_{\text{епч}}$ генератор продолжает самостоятельное измерение на всей второй части диапазона вплоть до $\max Q_{\text{изм}}$. В нижней первой части диапазона погрешности ограничиваются, поскольку структура встречно-параллельной схемы с отрицательной обратной связью уменьшает ошибки измерения по определению [4].

Работа побудителя потока поясняется рис.4, где показаны те моменты подключения побудителя потока (II), когда расход измеряемого потока (I) ниже естественного порога чувствительности самого струйного генератора. За счет этого индикатор практически полностью отображает величину измеренного расхода (III).

Рис.4 - Диаграмма работы побудителя потока, снижающая порог чувствительности. Показано: график I – расход на входе в расходомер, график II- моменты подключения и выключения побудителя, график III- измерение расхода расходомером при совместной работе струйного генератора и побудителя

Схема управления расходомера может быть построена без обратной связи с более простым алгоритмом действия, основанным на питании побудителя потока постоянной частотой. Это позволяет повысить надежность функционирования и сокращение функциональных блоков, но при этом снижается точность измерения в нижней части диапазона, в которой к тому же через струйный генератор необходимо пропускать повышающий суммарный расход. На рис. 5 представлена такая схема, в системе управления находятся следующие блоки: источник частотного питания 8 побудителя потока 5; задатчик 9 частотного сигнала, по которому от индикатора 12 отключается источник питания 8 побудителя потока 5; блок сравнения 10 частоты источника частотного питания 8 и частоты струйного генератора 2.

Рис. 5 - Структурная схема расходомера с постоянным расходом потока циркуляции

Побудитель потока 5 создаёт в начальной части диапазона поток циркуляции с постоянным расходом $Q_{\text{цир}}$. При появлении измеряемого расхода $Q_{\text{изм}}$ (рис.6), он присоединяется к циркулирующему потоку и совместно с ним проходит через струйный генератор 2, пока измеряемый расход потока $Q_{\text{изм}}$ не достигнет собственного порога чувствительности $Q_{\text{спч}}$ самого генератора 2. Величина частоты $f_{\text{зад}}$ задатчика 9 устанавливается в соответствии с величиной расхода $Q_{\text{спч}}$. далее генератор 2 расходомера генерирует частоту самостоятельно во всей части диапазона измерения.

Рис.6 - Характеристика струйного расходомера с постоянным расходом потока циркуляции

На рис. 7 показана конструктивная схема струйного расходомера в продольном и поперечном сечениях А-А и Б-Б с использованием стандартного струйного генератора 4 типа СГ-1 фирмы Релеро (Россия, г. Омск) и в качестве побудителя потока пьезогенератор 8 типа MZBX001 фирмы Murata (Япония). Пневмоэлектрический преобразователь в струйном генераторе 4 также пьезокристаллический. Таким образом, в этой конструктивной схеме струйного расходомера нет подвижных частей. На рис. 8 и 9 показаны экспериментальные характеристики этих звеньев, соответственно струйного генератора СГ-1 и пьезогенератора MZBX001.

Заключение

В статье рассмотрена возможность создания струйного расходомера с максимально расширенным диапазоном измерения текучих сред при низком пороге чувствительности.

Рис.7 – Конструктивная схема струйного расходомера в продольном и поперечном сечениях А-А и Б-Б

Фиг.8. Экспериментальная характеристика P - Q струйного генератора счетчика СГ-1 в диапазоне $Q = 40 \dots 1600$ л/ч.

Фиг.9. Характеристика P-Q пьезонасоса ПН tuRata в диапазоне $Q = 0 \dots 40$ л/ч

***

1. Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. Элементы струйной ав-томатики\ Москва. Машиностроение 1973г.\360 с.
2. Золотаревский С.А. К вопросу о расширении диапазона измерения расхода применительно к приборам коммерческого учета природного га-за\Периодический сборник научно-технических статей\выпуск 12,2013 г.\ г. Арзамас: ООО «Эльстер Газэлектроника,2013\ с.037- 043.
3. Беляев М.М., Хитрово А.А. Оценивание погрешности при измерении малых расходов дифференциальным методом\ ж. Д и С №1(44) 2003 г.с. 28-29.
4. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств\ Машиностроение. М. 1976. с.47-51.

Бурухина О.В., Сапашева А.Р.

Расчет гидравлического сопротивления трубного пространства теплообменного оборудования секции висбрекинга гудрона

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского
(Россия, Саратов)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-170

idsp: ljjournal-12-2018-170

Аннотация

Увеличение производительности, а вместе с ним и расчет пределов мощности уже имеющегося оборудования являются актуальными задачами для современной нефтеперерабатывающей промышленности. В статье произведен расчет гидравлического трубного пространства при увеличении производительности на 15% от регламентируемой.

Ключевые слова: висбрекинг, теплообменное оборудование, расчет запасов мощности.

Ранее нами сообщалось о технологических расчетах печи висбрекинга при введении в установку сокинг-камеры и расчете запаса площади поверхности теплообменника Т-101 установки висбрекинга [1-3]. Принимая во внимание известные исходные данные [1-3] рассчитаем гидравлическое сопротивление трубного пространства при увеличении регламентируемой мощности на 15%. Тогда мощность увеличится на 150 тыс. тонн и будет составлять 1150000 тонн.

Рассчитаем гидравлические сопротивления трубного пространства при повышенной мощности. Линейные скорости теплоносителей в трубном, межтрубном пространствах и в штуцерах:

$$W = \frac{G}{\rho \cdot S} = 1,12 \text{ м/с, где } \rho - \text{плотность теплоносителя, кг/м}^3; S - \text{площадь}$$

проходного сечения, м². Легкий газойль протекает по трубному пространству.

Плотность легкого газойля- 889 кг/м³. Площадь проходного сечения в трубном пространстве равна $5,5 \cdot 10^{-2}$ м².

Скорость течения теплоносителей в штуцерах $W_{шт,тр} = 1,99$ м/с.

Гидравлическое сопротивление для трубного пространства равно:

$$\Delta P_{тр} = \left[\lambda \frac{n l_{тр}}{d_{вн}} + \sum \xi_{тр} \right] \frac{\rho W_{тр}^2}{2} + \sum \xi_{шт} \frac{\rho W_{шт}^2}{2}, \text{ где } \lambda - \text{коэффициент гидравлического}$$

трения; $l_{тр}$ – длина теплообменной трубы, м; n – число ходов по трубному пространству; $\xi_{тр}$ – коэффициент местного сопротивления; $W_{тр}$ и $W_{шт}$ – скорости потоков в трубах и штуцерах, м/с.

Для определения коэффициента гидравлического трения вычислим критерий Рейнольдса для трубного пространства:

$$Re_{тр} = \frac{W_{тр} \cdot d_{вн} \cdot \rho_{гр}}{\mu_{гр}} = 4881, \text{ где } d_{вн} - \text{внутренний диаметр трубы, который равен}$$

0,025 мм²; $\mu_{гр}$ – динамическая вязкость гудрона, она равна $5,1 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Тогда гидравлическое сопротивление равно:

$$\Delta P_{тр} = \left[0,038 \frac{4 \cdot 6}{0,025} + 3,5 \right] \frac{889 \cdot (1,12)^2}{2} + 3 \frac{889 \cdot (1,99)^2}{2} = 27572,9 \text{ Па}.$$

***

1. А.А. Жигунов, О.В. Бурухина Технологический расчет печи висбрекинга при введении в установку сокинг-камеры // Вопросы биологии, экологии, химии и методики обучения: Сб. н. ст. В. 19. Саратов, 2017. С. 62-64.
2. Жигунов А.А. , Бурухина О.В. Технологический расчет печи и сокинг-камеры установки висбрекинга гудрона. Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии: межвуз. сб. н. тр. XII Всерос. конф. мол. ученых с междун. уч. Саратов: Саратовский источник. 2017. С. 202-204.
3. Бурухина О.В. Усовершенствование технологической схемы висбрекинга гудрона. Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований: Сб. стат. по итогам Междун. н.-пр. конф. (Уфа, 09 декабря 2017). /в 6 ч. Ч.6 - Стерлитамак: АМИ, 2017. С. 152-154.
4. Агашин Ю.В., Бурухина О.В. Расчет запаса площади поверхности теплообменника Т-101 установки висбрекинга. Совр. пробл. теор. и эксперим. химии: Межвуз. сб. н. тр. XIII Всерос. конф. мол. ученых с международ. участием. Саратов: Изд-во «Саратовский источник». 2018. С. 201-203.

Бурухина О.В., Карпенко Е.В.

Повышение эффективности теплообменного оборудования процесса гидрокрекинга

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
(Россия, Саратов)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-171

idsp: ljjournal-12-2018-171

Аннотация

Замена оборудования, увеличение производительности производства являются основными задачами в ходе модернизации производств нефтеперерабатывающей промышленности. В статье предлагается увеличение эффективности кожухотрубчатого теплообменника процесса гидрокрекинга за счет увеличения площади теплообмена обременением труб.

Ключевые слова: гидрокрекинг, теплообменное оборудование, повышение эффективности.

Ранее нами предлагалась модернизация основного оборудования процесса гидрокрекинга тяжелых углеводородов [1]. В данной работе предлагается замена теплообменного аппарата на более эффективный.

Исходные данные: расход нагреваемой среды 63006,75 кг/ч (вакуумный газойль – 61218 кг/ч; водородсодержащий газ (ВСГ) – 1788,75 кг/ч); начальная температура нагреваемой среды – 80 °С; теплоемкость нагреваемой среды 0,668 ккал/кг (теплоемкость вакуумного газойля – 0,635 $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$; теплоемкость ВСГ – 1,829 $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$).

Количество тепловой энергии, переданной нагреваемой среде в трех теплообменниках 14195,19 кВт. Принимаем, что количество тепла, передаваемое в каждом теплообменнике одинаково, тогда количество тепла, передаваемое в одном теплообменнике, составит 4,73 МВт.

Произведем расчет действующего теплообменника.

Критерий Рейнольдса для трубного пространства при скорости движения теплоносителя 1,3 м/с:

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} = 11818.$$

Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\nu}{\lambda / (c \cdot \rho)} = \frac{\nu \cdot c \cdot \rho}{\lambda} = 8.$$

Критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^m = 92,79.$$

Коэффициент теплоотдачи внутри трубки α_1 :

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = 811,9 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}} = 944,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

Число Рейнольдса для межтрубного пространства при скорости движения теплоносителя 0,2 м/с: $Re = 3105$.

Критерий Нуссельта: $Nu = 101,3$.

Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве:

$$\alpha_2 = 759,7 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}} = 883,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

Коэффициент теплопередачи в теплообменнике:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = 393,7 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{ч}} = 457,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

Площадь поверхности теплообмена: $F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t} = 328 \text{ м}^2$.

Задача повышения эффективности работы теплообменника сводится к повышению коэффициентов теплоотдачи и увеличению удельной поверхности теплообменника. Наиболее простой способ увеличения коэффициента теплопередачи – увеличить эффективную поверхность теплообмена со стороны меньшего коэффициента теплоотдачи. Эффективную поверхность теплообмена можно увеличить за счет оребрения наружной поверхности трубы.

Произведем расчет теплообменника с оребренными трубами:

$$\text{Коэффициент оребрения трубы: } K_{ор} = \frac{F_{оробр}}{F_{неоробр}} = 1,82.$$

Эффективная поверхность оребрения: $K_{рс} = 1,146$.

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = 870,6 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}} \quad K = 465 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

Поверхность теплообмена: $F = 278 \text{ м}^2$.

Таким образом, показана целесообразность замены теплообменного оборудования. Коэффициент теплоотдачи для межтрубного пространства увеличивается на 15%, а площадь поверхности может быть уменьшена на 20%.

***

1. М.В. Маякова, О.В. Бурухина Модернизация основного оборудования процесса гидрокрекинга тяжелых углеводородов// Вопросы биологии, экологии, химии и методики обучения: Сборник научных статей. Вып. 19. Саратов, 2017. С. 72-74.

Бурухина О.В., Миронова А.А.

Выбор теплообменника для процесса гидрокрекинга

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н. Г. Чернышевского
(Россия, Саратов)

doi: 10.18411/lj-12-2018-172

idsp: ljournal-12-2018-172

Аннотация

Процесс гидрокрекинга предназначен для производства малосернистых топливных дистиллятов из различного сырья. В статье разработан проект модернизации установки гидрокрекинга вакуумного газойля – замена теплообменника.

Ключевые слова: гидрокрекинг, реактор гидрокрекинга.

Ранее нами предлагалась модернизация основного оборудования процесса гидрокрекинга тяжелых углеводородов [1]. Так как в реактор сырье поступает через печь и теплообменник, то произведем технологический расчет теплообменника для определения температуры смеси, которая поступает далее в печь.

Для расчета используем следующие исходные данные: $T_1 = 400^\circ\text{C}$ - температура реакционной смеси после реактора, $T_2 = 200^\circ\text{C}$ - температура охлажденной реакционной смеси, $T_3 = 70^\circ\text{C}$ - температура поступающего сырья.

По уравнению теплоотдачи найдем поверхность теплообмена аппарата: $F = \frac{Q}{K \cdot \tau_{cp}}$.

где K - коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ;

τ_{cp} - средняя движущая сила или средняя разность температур между теплоносителями, $^\circ\text{C}$.

Определим тепловую нагрузку аппарата. Для этого составим тепловой баланс: $Q = G_1(\Delta H_1 - \Delta H_2)\eta = G_2(\Delta H_3 - \Delta H_4)$, где Q - тепловая нагрузка аппарата, $\text{кДж}/\text{час}$; G_1 , G_2 – массовые расходы горячего и холодного теплоносителя, $\text{кг}/\text{ч}$; ΔH_1 , ΔH_2 - энтальпия горячего теплоносителя при температуре входа и выхода из аппарата, $\text{кДж}/\text{кг}$; η - КПД теплообменника (0,95-0,97); ΔH_3 , ΔH_4 - энтальпия холодного теплоносителя при температурах входа и выхода из аппарата, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Горячий теплоноситель это реакционная смесь из реактора:

$$G_1 = G_c + G_{всг} = 285714 + 8571 = 294285 \text{ кг}/\text{ч}$$

Энтальпия горячего потока при $T_1 = 430^\circ\text{C}$: $\Delta H = 1202,9 \text{ кДж}/\text{кг}$

Энтальпия горячего потока при $T_2 = 200^\circ\text{C}$: $\Delta H_{\text{потока}} = 362,2 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Тепловая нагрузка теплообменника по горячему потоку:

$$Q_1 = 294285 (1202,9 - 362,2) \cdot 0,95 = 236015584 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

Тепловая нагрузка теплообменника по холодному потоку:

Энтальпия сырья при $T = 70^\circ\text{C}$: $\Delta H = 122,6 \text{ кДж}/\text{кг}$

Энтальпия водородсодержащего газа: $\Delta H_{всг} = 100,47 \text{ кДж}/\text{кг}$,

$$\Delta H_{\text{смеси}} = 0,97 \cdot 122,62 + 0,03 \cdot 100,47 = 121,95 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Так как $Q_1 = Q_2$, $Q_2 = 294285 (\Delta H_4 - 121,95)$,

$$236015584 = 294285 (\Delta H_4 - 121,95),$$

$$\Delta H_4 = 923,95 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Так как энтальпия паров нефтепродукта равна $\Delta H = b(4 - p_{15}) - 308,99$ найдем b , $\text{кДж}/\text{кг}$.

$$923,95 = b(4 - 0,929) - 308,99,$$

$$b = 302,5 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$T_4 = 180^\circ\text{C}.$$

Выберем противоточную схему теплообмена:

$$T_1 = 400^\circ\text{C} \rightarrow T_2 = 200^\circ\text{C},$$

$$T_4 = 180^\circ\text{C} \leftarrow T_3 = 70^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_6 = 220^\circ\text{C} \Delta t_m = 130^\circ\text{C},$$

$$\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} = \frac{220}{130} = 1,7 < 2.$$

Следовательно, t_{cp} рассчитывается как среднеарифметическое значение.

$$t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2} = \frac{220 + 130}{2} = 175^\circ\text{C}.$$

Согласно практическим данным для жидкостных трубчатых теплообменников коэффициент теплопередачи K обычно лежит в пределах 150–1200 Вт/м²·К. Примем $K = 200$ Вт/м²·К. Тогда расчетное значение необходимой поверхности теплопередачи:

$$F = \frac{65612332}{200 \cdot 175} = 1873 \text{ м}^2.$$

Необходимая поверхность теплообмена 1873 м².

Выбираем стандартный нормализованный теплообменник по справочным данным:

Теплообменные аппараты выбирают по поверхности теплообмена и по величине условного давления. На аппараты теплообменные кожухотрубчатые стальные с поверхностью теплообмена до 5000 м² для охлаждения и нагрева жидких и газообразных сред и при температуре от –60 до +600°C разработан ГОСТ 9929–77.

Поверхность теплообмена $F = 641 \text{ м}^2$, диаметр кожуха $D = 1200$ мм, диаметр труб $d_{\text{вн}} = 25$ мм, длина труб $L = 6000$ мм.

$$\text{Необходимое количество теплообменников: } \frac{1873}{641} = 2,9.$$

Принимаем 3 теплообменника с поверхностью 641 м².

***

1. М.В. Маякова, О.В. Бурухина Модернизация основного оборудования процесса гидрокрекинга тяжелых углеводородов// Вопросы биологии, экологии, химии и методики обучения: Сборник научных статей. Вып. 19. Саратов, 2017. С. 72-74.

Вавилов В.А.

Исследование функционирующей в полумарковской среде RQ-системы с вызываемыми заявками

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
(Россия, Томск)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-173

idsp: ljjournal-12-2018-173

Аннотация

В работе рассматривается RQ-система (retrial queue, система с повторными вызовами) с простейшим входящим потоком заявок, ожиданием на орбите и функционированием в случайной (полумарковской) среде. Методом асимптотического анализа исследуются средние характеристики, величины отклонения, плотность распределения вероятностей значений процесса изменения состояний системы.

Ключевые слова: система с повторными вызовами, орбита, случайная среда, полумарковский процесс, метод асимптотического анализа

1. Построение математической модели. Во многих современных системах обслуживания, таких как call-центры, в целях повышения эффективности функционирования и минимизации времени простоя операторы не только принимают входящие вызовы (заявки), но и, в случае отсутствия входящих, для продвижения услуг компании совершают исходящие звонки клиентам. Такого рода системы моделируются

RQ-системами с вызываемыми заявками [1, 2]. Деятельность операторов зависит от ряда случайных факторов, которые непосредственно влияют на успешность дозвона и время работы с каждым конкретным клиентом. Совокупность таких факторов называют случайной средой. В качестве математических моделей случайной среды рассматривается цепь Маркова с непрерывным временем [3, 4], диффузионный процесс [5], полумарковский процесс [6, 7].

В данной работе рассмотрим RQ-систему, на вход которой поступает простейший с параметром λ поток заявок. Заявка, заставшая в момент поступления прибор свободным, начинает обслуживаться в течение экспоненциально распределённого промежутка времени с параметром μ_1 . По завершении обслуживания заявка покидает систему. Заявка, заставшая в момент поступления прибор занятым, мгновенно уходит на орбиту. Повторное обращение заявок к прибору из орбиты происходит после случайной задержки, продолжительность которой имеет экспоненциальное распределение с параметром γ . Число заявок на орбите обозначим i . Если прибор свободен, он вызывает для обслуживания дополнительные заявки из внешней среды с интенсивностью α . Вызываемая заявка занимает прибор для обслуживания, длительность которого имеет экспоненциальное распределение с параметром μ_2 . Таким образом, прибор RQ-системы может находиться в одном из трёх состояний: $k = 0$, если он свободен; $k = 1$, если он занят обслуживанием заявки; $k = 2$, если на приборе реализуется обслуживание вызываемой заявки.

Сеть функционирует в случайной среде. В качестве математической модели случайной среды рассмотрим полумарковский процесс $s(t)$ с непрерывным временем t , то есть такой дискретный случайный процесс, который принимает значения из конечного множества состояний $s = 1, 2, \dots, S$ и для которого вложенная по моментам времени t_n изменения состояний цепь $s(t_n)$ является Марковской. Времена пребывания этого процесса в различных состояниях являются условно независимыми случайными величинами, распределение вероятностей значений которых зависит лишь от номера состояния полумарковского процесса.

Для определения полумарковского процесса $s(t)$ зададим стохастическую матрицу одношаговых вероятностей $p_{s_1 s_2}$ переходов вложенной цепи Маркова $p_{s_1 s_2} = P(s(t_{n+1}) = s_2 | s(t_n) = s_1)$, будем полагать, что $p_{ss} = 0$. Понятно, что $\sum_{s_2=1}^S p_{s_1 s_2} = 1$, $s = 1, 2, \dots, S$. Также зададим набор функций распределения $G_s(x)$ значений времени пребывания полумарковского процесса в s -м состоянии.

Влияние случайной среды на функционирование RQ-системы определяется зависимостью интенсивностей μ_1 и μ_2 обслуживания заявок от состояний $s(t) = s$ случайной среды, то есть $\mu_1 = \mu_1(s)$, $\mu_2 = \mu_2(s)$. Вероятности окончания обслуживания заявки и вызываемой заявки на приборе за бесконечно малый промежуток времени Δt соответственно равны $\mu_1(s)\Delta t + o(\Delta t)$ и $\mu_2(s)\Delta t + o(\Delta t)$.

Трёхмерный случайный вектор $\{k(t), i(t), s(t)\}$ является полумарковским процессом. Для исследования описанной модели марковизируем процесс $\{k(t), i(t), s(t)\}$ методом дополнительной переменной. Введем переменную $\zeta(t)$, имеющую смысл длины интервала времени от момента t до момента смены текущего состояния случайной среды, тогда процесс изменения значений вектора $\{k(t), i(t), s(t), \zeta(t)\}$ является марковским процессом.

Обозначим $P(k(t) = k, i(t) = i, s(t) = s, \zeta(t) < \zeta) = P_k(i, s, \zeta, t)$.

В любой момент времени должно выполняться условие нормировки

$$\sum_{k=0}^2 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{s=1}^s P_k(i, s, \infty, t) = 1.$$

Для распределения $P_k(i, s, \zeta, t)$ можно составить систему дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_0(i, s, \zeta, t)}{\partial t} + (\alpha + \lambda + i\gamma)P_0(i, s, \zeta, t) &= \frac{\partial P_0(i, s, \zeta, t)}{\partial \zeta} - \frac{\partial P_0(i, s, 0, t)}{\partial \zeta} + \\ &+ \mu_1(s)P_1(i, s, \zeta, t) + \mu_2(s)P_2(i, s, \zeta, t) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial P_0(i, s_1, 0, t)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ \frac{\partial P_1(i, s, \zeta, t)}{\partial t} + (\lambda + \mu_1(s))P_1(i, s, \zeta, t) &= \frac{\partial P_1(i, s, \zeta, t)}{\partial \zeta} - \frac{\partial P_1(i, s, 0, t)}{\partial \zeta} + \\ &+ \lambda P_0(i, s, \zeta, t) + (i+1)\gamma P_0(i+1, s, \zeta, t) + \lambda P_1(i-1, s, \zeta, t) + \\ &+ G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial P_1(i, s_1, 0, t)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ \frac{\partial P_2(i, s, \zeta, t)}{\partial t} + (\lambda + \mu_2(s))P_2(i, s, \zeta, t) &= \frac{\partial P_2(i, s, \zeta, t)}{\partial \zeta} - \frac{\partial P_2(i, s, 0, t)}{\partial \zeta} + \\ &+ \alpha P_0(i, s, \zeta, t) + \lambda P_2(i-1, s, \zeta, t) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial P_2(i, s_1, 0, t)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}. \end{aligned} \quad (1)$$

Систему (1) будем исследовать методом асимптотического анализа [8] в условиях большой задержки $\gamma \rightarrow 0$. Для этого в (1) выполним замены:

$$\gamma = \varepsilon^2, \quad \varepsilon^2 t = \tau, \quad \varepsilon^2 i = x + \varepsilon y, \quad P_k(i, s, t) / \varepsilon = H_k(y, s, \tau, \varepsilon), \quad (2)$$

тогда получим систему вида

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \tau} - \varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \\ + (\alpha + \lambda + x + \varepsilon y)H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) &= \mu_1(s)H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \\ &+ \mu_2(s)H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_0(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ \varepsilon^2 \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \tau} - \varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \\ &+ (\lambda + \mu_1(s))H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) = \lambda H_1(y - \varepsilon, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \\ &+ (x + \varepsilon(y + \varepsilon))H_0(y + \varepsilon, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \lambda H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \\ &+ G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_1(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ \varepsilon^2 \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \tau} - \varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \\ &+ (\lambda + \mu_2(s))H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) = \alpha H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \\ &+ \lambda H_2(y - \varepsilon, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_2(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}. \end{aligned} \quad (3)$$

2. Исследование асимптотических средних характеристик. Под асимптотическими средними характеристиками RQ-систем с вызываемыми заявками, будем понимать распределение вероятностей $R_k(x)$ состояний k канала и предельную функцию $x(\tau) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\varepsilon^2 i(\tau/\varepsilon^2))$, имеющую смысл асимптотического среднего нормированного числа заявок в системе.

В системе (3) положим $\varepsilon \rightarrow 0$ и, полагая, что существуют пределы

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} H_k(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) = H_k(y, s, \zeta, \tau), \quad (4)$$

получим систему

$$\begin{aligned} (\alpha + \lambda + x)H_0(y, s, \zeta, \tau) &= \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_0(y, s, 0, \tau)}{\partial \zeta} + \\ &+ \mu_1(s)H_1(y, s, \zeta, \tau) + \mu_2(s)H_2(y, s, \zeta, \tau) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_0(y, s_1, 0, \tau)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ \mu_1(s)H_1(y, s, \zeta, \tau) &= \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_1(y, s, 0, \tau)}{\partial \zeta} + \\ &+ (\lambda + x)H_0(y, s, \zeta, \tau) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_1(y, s_1, 0, \tau)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ \mu_2(s)H_2(y, s, \zeta, \tau) &= \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_2(y, s, 0, \tau)}{\partial \zeta} + \\ &+ \alpha H_0(y, s, \zeta, \tau) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_2(y, s_1, 0, \tau)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение $H_k(y, s, \zeta, \tau)$ системы (5) будем искать в виде

$$H_k(y, s, \zeta, \tau) = Q_k(x, s, \zeta)H(y, \tau). \quad (6)$$

Тогда $Q_k(x, s, \zeta)$, имеющая смысл условного совместного распределения вероятностей состояний k канала и s среды при условии $x(\tau) = x$, определяется системой вида

$$\begin{aligned} (\alpha + \lambda + x)Q_0(x, s, \zeta) &= \frac{\partial Q_0(x, s, \zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial Q_0(x, s, 0)}{\partial \zeta} + \\ &+ \mu_1(s)Q_1(x, s, \zeta) + \mu_2(s)Q_2(x, s, \zeta) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial Q_0(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ \mu_1(s)Q_1(x, s, \zeta) &= \frac{\partial Q_1(x, s, \zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial Q_1(x, s, 0)}{\partial \zeta} + \\ &+ (\lambda + x)Q_0(x, s, \zeta) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial Q_1(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ \mu_2(s)Q_2(x, s, \zeta) &= \frac{\partial Q_2(x, s, \zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial Q_2(x, s, 0)}{\partial \zeta} + \\ &+ \alpha Q_0(x, s, \zeta) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial Q_2(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} \end{aligned} \quad (7)$$

и условием нормировки

$$\sum_{k=0}^2 \sum_{s=1}^S Q_k(x, s, \infty) = 1. \quad (8)$$

Будем полагать, что $Q_k(x, s, \zeta)$ известны, если удастся каким либо образом решить систему (8).

Далее покажем, что $x = x(\tau)$ является детерминированной функцией.

В системе (3) функции $H_k(y \pm \varepsilon, s, \zeta, \tau, \varepsilon)$ разложим в ряд по приращениям аргумента y с точностью до $o(\varepsilon)$, получим

$$\begin{aligned} & -\varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + (\alpha + \lambda + x + \varepsilon y) H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) = \\ & = \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_0(y, s, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} + \mu_1(s) H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \\ & + \mu_2(s) H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^S \frac{\partial H_0(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\ & -\varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \mu_1(s) H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) = \\ & = \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_1(y, s, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} - \varepsilon \lambda \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \\ & + (x + \varepsilon y) H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \varepsilon x \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \\ & + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^S \frac{\partial H_1(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} + o(\varepsilon), \\ & -\varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \mu_2(s) H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) = \\ & = \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_2(y, s, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} + \alpha H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) - \\ & - \varepsilon \lambda \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^S \frac{\partial H_2(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} + o(\varepsilon). \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения системы (9) просуммируем по k и по s , при $\zeta \rightarrow \infty$ поделим на ε обе части полученного уравнения, выполним предельный переход (4), учтём (6), получим

$$\begin{aligned} -x'(\tau) \sum_{k=0}^2 \sum_{s=1}^S Q_k(x, s) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} = & \left\{ x \sum_{s=1}^S Q_0(x, s) - \lambda \sum_{s=1}^S Q_1(x, s) - \right. \\ & \left. - \lambda \sum_{s=1}^S Q_2(x, s) \right\} \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y}. \end{aligned}$$

Учтем условие нормировки (8), обозначим

$$R_k(x) = \lim_{\zeta \rightarrow \infty} \sum_{s=1}^S Q_k(x, s, \zeta), \quad (10)$$

заметим, что $R_k(x)$ – распределение вероятностей состояний канала, получим

$$\{x'(\tau) + xR_0(x) - \lambda(R_1(x) + R_2(x))\} \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} = 0.$$

Поскольку производная плотности распределения $H(y, \tau)$ не может тождественно равняться нулю, следовательно, функция $x = x(\tau)$ является решением обыкновенного дифференциального уравнения

$$x'(\tau) = -xR_0(x) + \lambda(R_1(x) + R_2(x)) = \lambda - (\lambda + x)R_0(x). \quad (11)$$

Получили, что $x = x(\tau)$ является детерминированной функцией.

3. Величины отклонения нормированного числа заявок от среднего.

Рассмотрим процесс $y(\tau) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} ((\varepsilon^2 i(\tau/\varepsilon^2) - x(\tau))/\varepsilon)$, который характеризует изменение величин отклонения нормированного числа заявок в системе от их асимптотического среднего и покажем, что он является диффузионным процессом авторегрессии.

Обозначим

$$x'(\tau) = A(x) = \lambda - (\lambda + x)R_0(x). \quad (12)$$

Будем искать решение $H_k(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)$ системы (3) в виде разложения:

$$H_k(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) = Q_k(x, s, \zeta)H(y, \tau) + \varepsilon h_k(y, s, \zeta, \tau) + o(\varepsilon). \quad (13)$$

Подставим в систему (9) разложение (13), учтем (7) и запишем полученную систему, сократив на ε все уравнения в следующем виде:

$$\begin{aligned} & -(\alpha + \lambda + x)h_0(y, s, \zeta, \tau) + \mu_1(s)h_1(y, s, \zeta, \tau) + \mu_2(s)h_2(y, s, \zeta, \tau) + \\ & + \frac{\partial h_0(y, s, \zeta, \tau)}{\partial \zeta} - \frac{\partial h_0(y, s, 0, \tau)}{\partial \zeta} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_0(y, s_1, 0, \tau)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = \\ & = Q_0(x, s, \zeta) y H(y, \tau) - x'(\tau) Q_0(x, s, \zeta) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y}, \\ & - \mu_1(s)h_1(y, s, \zeta, \tau) + (\lambda + x)h_0(y, s, \zeta, \tau) + \\ & + \frac{\partial h_1(y, s, \zeta, \tau)}{\partial \zeta} - \frac{\partial h_1(y, s, 0, \tau)}{\partial \zeta} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_1(y, s_1, 0, \tau)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = \\ & = -Q_0(x, s, \zeta) y H(y, \tau) - ((x'(\tau) - \lambda)Q_1(x, s, \zeta) + xQ_0(x, s, \zeta)) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y}, \\ & - \mu_2(s)h_2(y, s, \zeta, \tau) + \alpha h_0(y, s, \zeta, \tau) + \\ & + \frac{\partial h_2(y, s, \zeta, \tau)}{\partial \zeta} - \frac{\partial h_2(y, s, 0, \tau)}{\partial \zeta} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_2(y, s_1, 0, \tau)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = \\ & = -(x'(\tau) - \lambda)Q_2(x, s, \zeta) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y}. \end{aligned} \quad (14)$$

Будем искать решение системы (14) в следующем виде

$$h_k(y, s, \zeta, \tau) = h_k^{(1)}(x, s, \zeta) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} + h_k^{(2)}(x, s, \zeta) y H(y, \tau). \quad (15)$$

Подставим (15) в (14) и представим систему в виде двух систем

$$\begin{aligned} & -(\alpha + \lambda + x)h_0^{(1)}(x, s, \zeta) + \mu_1(s)h_1^{(1)}(x, s, \zeta) + \\ & + \mu_2(s)h_2^{(1)}(x, s, \zeta) + \frac{\partial h_0^{(1)}(x, s, \zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial h_0^{(1)}(x, s, 0)}{\partial \zeta} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_0^{(1)}(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = -x'(\tau) Q_0(x, s, \zeta), \\
& - \mu_1(s) h_1^{(1)}(x, s, \zeta) + (\lambda + x) h_0^{(1)}(x, s, \zeta) + \\
& + \frac{\partial h_1^{(1)}(x, s, \zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial h_1^{(1)}(x, s, 0)}{\partial \zeta} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_1^{(1)}(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = \\
& = -(x'(\tau) - \lambda) Q_1(x, s, \zeta) - x Q_0(x, s, \zeta), \\
& - \mu_2(s) h_2^{(1)}(x, s, \zeta) + \alpha h_1^{(1)}(x, s, \zeta) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_2^{(1)}(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = \\
& = -(x'(\tau) - \lambda) Q_2(x, s, \zeta)
\end{aligned} \tag{16}$$

и

$$\begin{aligned}
& - (\alpha + \lambda + x) h_0^{(2)}(x, s, \zeta) + \mu_1(s) h_1^{(2)}(x, s, \zeta) + \mu_2(s) h_2^{(2)}(x, s, \zeta) + \\
& + \frac{\partial h_0^{(2)}(x, s, \zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial h_0^{(2)}(x, s, 0)}{\partial \zeta} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_0^{(2)}(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = Q_0(x, s, \zeta), \\
& - \mu_1(s) h_1^{(2)}(x, s, \zeta) + (\lambda + x) h_0^{(2)}(x, s, \zeta) + \\
& + \frac{\partial h_0^{(2)}(x, s, \zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial h_0^{(2)}(x, s, 0)}{\partial \zeta} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_0^{(2)}(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = -Q_0(x, s, \zeta), \\
& - \mu_2(s) h_2^{(2)}(x, s, \zeta) + \alpha h_0^{(2)}(x, s, \zeta) + \\
& + \frac{\partial h_2^{(2)}(x, s, \zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial h_2^{(2)}(x, s, 0)}{\partial \zeta} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial h_2^{(2)}(x, s_1, 0)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} = 0.
\end{aligned} \tag{17}$$

Продифференцируем систему (7) по x и полученный результат сопоставим с (17). Тогда можно сделать вывод, что

$$h_k^{(2)}(x, s, \zeta) = \frac{\partial Q_k(x, s, \zeta)}{\partial x}. \tag{18}$$

С учётом (18) и (15) разложение (13) примет вид

$$\begin{aligned}
H_k(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) &= Q_k(x, s, \zeta) H(y, \tau) + \varepsilon h_k^{(1)}(x, s, \zeta) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} + \\
&+ \varepsilon y H(y, \tau) \frac{\partial Q_k(x, s, \zeta)}{\partial x} + o(\varepsilon).
\end{aligned} \tag{19}$$

Найдём вид функции $H(y, \tau)$. Для этого функции в правой части системы (3) разложим в ряд по приращениям аргумента y с точностью до $o(\varepsilon^2)$:

$$\begin{aligned}
\varepsilon^2 \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \tau} - \varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + (\alpha + \lambda + x + \varepsilon y) H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) &= \\
= \frac{\partial H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_0(y, s, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} + \mu_1(s) H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \\
+ \mu_2(s) H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_0(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s}, \\
\varepsilon^2 \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \tau} - \varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \mu_1(s) H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) &=
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_1(y, s, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} - \\
&\varepsilon \lambda \frac{\partial H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \lambda \frac{\varepsilon^2}{2} \frac{\partial^2 H_1(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y^2} + \\
&+ (\lambda + x + \varepsilon y) H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \{ (x + \varepsilon y) H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) \} + \\
&+ x \frac{\varepsilon^2}{2} \frac{\partial^2 H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y^2} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_1(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} + o(\varepsilon^2), \\
&\varepsilon^2 \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \tau} - \varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + (\lambda + \mu_2(s)) H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) = \\
&= \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} - \frac{\partial H_2(y, s, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} + \alpha H_0(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) + \\
&+ \lambda H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) - \lambda \varepsilon \frac{\partial H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y} + \\
&+ \lambda \frac{\varepsilon^2}{2} \frac{\partial^2 H_2(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon)}{\partial y^2} + G_s(\zeta) \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_2(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} + o(\varepsilon^2). \quad (20)
\end{aligned}$$

Сложим уравнения системы (20) по k , подставим в полученную систему разложение функций $H_k(y, s, \tau, \varepsilon)$ в виде (19), учтем обозначение (10), получим

$$\begin{aligned}
&\varepsilon^2 \left(\sum_{k=0}^2 Q_k(x, s, \zeta) \right) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial \tau} - \varepsilon x'(\tau) \left(\sum_{k=0}^2 Q_k(x, s, \zeta) \right) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} - \\
&- \varepsilon^2 x'(\tau) \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \sum_{k=0}^2 Q_k(x, s, \zeta) \right\} \frac{\partial \{yH(y, \tau)\}}{\partial y} - \varepsilon^2 x'(\tau) \left(\sum_{k=0}^2 h_k^{(1)}(x, s, \zeta) \right) \frac{\partial^2 H(y, \tau)}{\partial y^2} = \\
&= \frac{\partial}{\partial \zeta} \left\{ \sum_{k=0}^2 H_k(y, s, \zeta, \tau, \varepsilon) \right\} - \frac{\partial}{\partial \zeta} \left\{ \sum_{k=0}^2 H_k(y, s, 0, \tau, \varepsilon) \right\} - \\
&- \varepsilon (-xQ_0(x, \zeta, s) + \lambda Q_1(x, \zeta, s) + \lambda Q_2(x, \zeta, s)) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} - \\
&- \varepsilon^2 \left(-Q_0(x, s, \zeta) - x \frac{\partial Q_0(x, s, \zeta)}{\partial x} + \lambda \frac{\partial}{\partial x} \{ Q_1(x, s, \zeta) + Q_2(x, s, \zeta) \} \right) \frac{\partial \{yH(y, \tau)\}}{\partial y} + \\
&+ \frac{\varepsilon^2}{2} [xQ_0(x, s, \zeta) + \lambda Q_1(x, s, \zeta) + \lambda Q_2(x, s, \zeta) + \\
&+ 2(xh_0^{(1)}(x, s, \zeta) - \lambda h_1^{(1)}(x, s, \zeta) - \lambda h_2^{(1)}(x, s, \zeta))] \frac{\partial^2 H(y, \tau)}{\partial y^2} + \\
&+ G_s(\zeta) \sum_{k=0}^2 \sum_{s_1=1}^s \frac{\partial H_k(y, s_1, 0, \tau, \varepsilon)}{\partial \zeta} p_{s_1 s} + o(\varepsilon^2). \quad (21)
\end{aligned}$$

Просуммируем уравнения системы (21) по s , выполним предельный переход при $\zeta \rightarrow \infty$, воспользуемся условием нормировки (8), обозначением (10), также обозначим

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} \sum_{s=1}^S h_k^{(1)}(x, s, \zeta) = h_k^{(1)}(x), \quad \sum_{k=1}^2 h_k^{(1)}(x) = h^{(1)}(x), \quad (22)$$

учтём, что $\sum_{s_2=1}^S p_{s_1 s_2} = 1$, $s = 1, 2, \dots, S$, получим

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial \tau} - \varepsilon x'(\tau) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} - \varepsilon^2 x'(\tau) h^{(1)}(x) \frac{\partial^2 H(y, \tau)}{\partial y^2} = \\ = -\varepsilon(-xR_0(x) + \lambda R_1(x) + \lambda R_2(x)) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} - \\ - \varepsilon^2 \left(-R_0(x) - x \frac{\partial R_0(x)}{\partial x} + \lambda \frac{\partial}{\partial x} \{R_1(x) + R_2(x)\} \right) \frac{\partial \{yH(y, \tau)\}}{\partial y} + \\ + \frac{\varepsilon^2}{2} [xR_0(x) + \lambda R_1(x) + \lambda R_2(x) + \\ + 2(xh_0^{(1)}(x) - \lambda h_1^{(1)}(x) - \lambda h_2^{(1)}(x))] \frac{\partial^2 H(y, \tau)}{\partial y^2} + o(\varepsilon^2). \end{aligned} \quad (23)$$

В силу дифференциального уравнения (11) уничтожим в (23) слагаемые порядка $o(\varepsilon)$, поделим обе части полученного уравнения на ε^2 , выполним преобразования, будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial \tau} = - \left(-R_0(x) - x \frac{\partial R_0(x)}{\partial x} + \lambda \frac{\partial}{\partial x} \{R_1(x) + R_2(x)\} \right) \frac{\partial \{yH(y, \tau)\}}{\partial y} + \\ + \frac{1}{2} [xR_0(x) + \lambda R_1(x) + \lambda R_2(x) + 2(xh_0^{(1)}(x) - (\lambda + x)R_0(x)h^{(1)}(x))] \frac{\partial^2 H(y, \tau)}{\partial y^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

Получили уравнение Фоккера – Планка для плотности распределения вероятностей $H(y, \tau)$ значений диффузионного процесса авторегрессии $y(\tau)$. Заметим, что коэффициент переноса уравнения (24) есть производная по x от правой части дифференциального уравнения (11). В силу обозначения (12):

$$A'_x(x) = -R_0(x) - x \frac{\partial R_0(x)}{\partial x} + \lambda \frac{\partial}{\partial x} \{R_1(x) + R_2(x)\} = \frac{\partial}{\partial x} \{\lambda - (\lambda + x)R_0(x)\}. \quad (25)$$

Коэффициент диффузии обозначим следующим образом:

$$B^2(x) = \lambda - (\lambda - x)R_0(x) + 2xh_0^{(1)}(x) - 2(\lambda + x)R_0(x)h^{(1)}(x). \quad (26)$$

Из (24) следует, что $H(y, \tau)$ является плотностью распределения вероятностей диффузионного процесса $y(\tau)$, который удовлетворяет стохастическому дифференциальному уравнению

$$dy(\tau) = A'_x(x)y(\tau)d\tau + B(x)dw(\tau), \quad (27)$$

где $w(\tau)$ является стандартным процессом Винера, то есть процесс $y(\tau)$ является процессом авторегрессии.

4. Плотность распределения вероятностей процесса изменения состояний RQ-системы. Используя предельные процессы $x(\tau)$ и $y(\tau)$ для достаточно малых значений параметра ε , рассмотрим процесс $z(\tau) = x(\tau) + \varepsilon y$, который аппроксимирует процесс изменения числа заявок в системе $\varepsilon^2 i(\tau/\varepsilon^2)$ и покажем, что он является однородным диффузионным процессом.

Дифференцируя $z(\tau)$ по τ получаем $dz(\tau) = x'(\tau)d\tau + \varepsilon dy$.

В силу (11) и (12) имеем:

$$dz(\tau) = [-xR_0(x) + \lambda(R_1(x) + R_2(x))]d\tau + \varepsilon y \frac{\partial}{\partial x} \{-xR_0(x) + \lambda(R_1(x) + R_2(x))\}d\tau + \varepsilon B(x)dw(\tau).$$

Так как правая часть содержит разложение в ряд по приращениям εy аргумента x , то можно записать

$$dz(\tau) = [-(x + \varepsilon y)R_0(x + \varepsilon y) + \lambda(R_1(x + \varepsilon y) + R_2(x + \varepsilon y))]d\tau + \varepsilon B(x + \varepsilon y)dw(\tau).$$

С точностью до $o(\varepsilon)$ и с учетом (12) имеем:

$$dz(\tau) = A(z)d\tau + \varepsilon B(z)dw(\tau) + o(\varepsilon). \quad (28)$$

То есть, $z(\tau)$ действительно является однородным диффузионным процессом с коэффициентом переноса $A(z)$ и коэффициентом диффузии $\varepsilon^2 B^2(z)$ и определяется с точностью до $o(\varepsilon)$ стохастическим дифференциальным уравнением вида (28).

Обозначим $F(z, \tau)$ плотность распределения вероятностей значений процесса $z(\tau)$, тогда можно записать уравнение Фоккера – Планка:

$$\frac{\partial F(z, \tau)}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial z} \{A(z)F(z, \tau)\} + \frac{\varepsilon^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \{B^2(z)F(z, \tau)\}.$$

Рассмотрим функционирование процесса $z(\tau)$ в стационарном режиме, то есть $F(z, \tau) \equiv F(z)$, тогда стабильное распределение можно найти из уравнения Фоккера – Планка

$$0 = -\frac{\partial}{\partial z} \{A(z)F(z)\} + \frac{\varepsilon^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \{B^2(z)F(z)\}. \quad (29)$$

Уравнение (29) является однородным дифференциальным уравнением второго порядка и имеет решение:

$$F(z) = \frac{1}{B^2(z)} e^{\frac{2}{\varepsilon^2} \int_0^z \frac{A(u)}{B^2(u)} du} \left/ \int_0^\infty \frac{1}{B^2(z)} e^{\frac{2}{\varepsilon^2} \int_0^z \frac{A(u)}{B^2(u)} du} dz \right. \quad (30)$$

Заключение. Таким образом, в данной работе предложена математическая модель функционирующей в полумарковской среде RQ-системы с вызываемыми заявками. Методом асимптотического анализа [8] получено обыкновенное дифференциальное уравнение (11), определяющее асимптотическое среднее $x = x(\tau)$ нормированного числа заявок в системе. Представлено распределение $R_k(x)$, $k = 0, 1, 2$, вероятностей состояний прибора в виде (10), где величины $Q_k(x, s, \zeta)$, $k = 0, 1, 2$, имеющие смысл условного совместного распределения вероятностей состояний k канала и состояний s полумарковской среды, определяются системой уравнений вида (7). Показано, что процесс $y(\tau)$, характеризующий изменение величин отклонения нормированного числа заявок в системе от их асимптотического среднего, является диффузионным процессом авторегрессии и определяется стохастическим дифференциальным уравнением вида (27). Показано, что для достаточно малых значений параметра ε процесс $z(\tau) = x(\tau) + \varepsilon y$, является однородным диффузионным процессом. Найдена важная вероятностно-временная

характеристика процесса $z(\tau)$ – плотность распределения вероятностей его значений в виде (30).

***

1. Artalejo J. R., Gomez-Corral A.: Retrial Queueing Systems: A Computational Approach. Springer, Heidelberg, 2008.
2. Вавилов В. А. Исследование одноканальной системы с повторными вызовами // Методы прогнозирования в технике и технологиях: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Тюмень, 20 февраля 2018 г.). В 2 ч. Ч. 2. – Уфа: Аэтерна, 2018. – С. 6-13.
3. Вавилов В. А. Исследование немарковских RQ-систем, функционирующих в случайной среде // Современные концепции научных исследований: ежемесячный научный журнал. – М.: ЕСУ, 2014. – № 5 (13). – С. 56-59.
4. Вавилов В. А. Исследование RQ-систем в условиях возрастающего количества абонентских станций // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2012): Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (23-24 ноября 2012 г.) – Кемерово, 2012. – Ч. 2. – С. 80-85.
5. Вавилов В. А. Математическое моделирование неустойчивых сетей случайного доступа в диффузионной среде при дважды стохастическом входящем потоке // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. Научный журнал. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – № 2 (7). – С. 31-5
6. Вавилов В. А. Исследование RQ-систем, функционирующих в полумарковской среде // Вестник Кемеровского государственного университета. – Кемерово: КемГУ, 2014. – № 3 (59) Т.3. – С. 99-106.
7. Вавилов В. А., Назаров А. А. Исследование RQ-систем в полумарковской среде // Международная конференция "Теория вероятностей и ее приложения", посвященная 100-летию со дня рождения Б. В. Гнеденко. Москва: Ленанд, 2012. – С. 180-183.
8. Назаров А. А., Моисеева С. П. Метод асимптотического анализа в теории массового обслуживания. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 112 с.

Герасимов А.И., Данзанова Е.В.

Способ сварки полимерных толстостенных труб

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН
(Россия, Якутск)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-174

idsp: ljjournal-12-2018-174

Аннотация

Сварка нагретым инструментом встык зарекомендовала себя как надежный способ сварки полимерных труб. Однако, при сварке полимерных толстостенных труб существует проблема возникновения порообразования в сварном шве, а также влияние силы гравитации на течение расплава, что препятствует удалению окисленного слоя. В работе предложен способ решения этой проблемы.

Ключевые слова. Полимерные трубы, полиэтилен, сварка нагретым инструментом встык, дополнительная поверхность, грат.

Трубопроводы из полимерных материалов прочно вошли в нашу жизнь: это газораспределительные сети, трубопроводы горячего и холодного водоснабжения, системы отопления и канализации. В западных странах еще с семидесятых годов прошлого века в городском хозяйстве широко стали применяться полиэтиленовые трубы большого диаметра до 1200 мм [1] и 1400мм [2]. Известно, что для сохранения округлой формы полимерных труб толщина их стенок тем больше, чем больше диаметр, т.е. с увеличением диаметра увеличивается толщина стенки, но это не означает увеличение допустимого рабочего давления трубы, наоборот, чем больше диаметр трубы, тем меньше значение рабочего давления. Поэтому полимерные трубы большого диаметра используются для сточных и канализационных трубопроводов, не требующих значительного давления. Для соединения труб большого диаметра

требуется сварочное оборудование соответствующего размера со специальным подъемным оборудованием. В последние годы разрабатываются различные способы герметизации стыков труб большого диаметра. На наш взгляд, наиболее перспективным из таких технологий является разработка НПО «Стройполимер», возглавляемый Устюговым В. А., по гидроизоляции стыковых соединений [3-6], в которой гидроизоляция осуществляется путем оплавления термопластичной оболочки, охватывающей весь периметр соединяемых торцов трубы, и наружной поверхности концов трубы зигзагообразным нагревательным элементом (рис.1). Однако такое соединение является не прочным и при малейшем сдвиге соединенных труб герметичность нарушается из-за разрушения термопластичной оболочки.

Рис. 1. Схема устройства для гидроизоляции стыковых соединений конструкций: 1 - электронагреватель; 2 – термопластичная полимерная лента; 3 – концы для подключения источника электрического тока

Из известных способов соединения полимерных труб, не требующих дополнительных соединяемых деталей и материалов для сварки является способ сварки встык нагретым инструментом. Процесс контактной сварки оплавлением является двухэтапным. Сначала торцы соединяемых труб оплавляются непосредственным контактом нагретого инструмента, поверхность которого покрыта противадгезионной пленкой. Затем нагретый инструмент удаляют, и оплавленные торцы друг к другу осаживают под давлением и выдерживают определенное время под этим давлением. Оплавленные и находящиеся при высокой температуре поверхности торцов полимерных труб при контакте с воздухом окисляются, образуя на поверхности торцов окисленный слой, достигающий до толщины 40-60 мкм. Под давлением осадки этот окисленный слой с поверхности обоих торцов выходит вне стенок трубы вместе с расплавленными частями труб, образуя внутренний и внешний граты. Поэтому чем больше толщина стенки трубы, тем на большую глубину необходимо их проплавить для обеспечения полного вывода окисленного слоя за стенки соединяемых труб. Большую глубину проплавления можно добиться двумя путями: повышением температуры оплавления или увеличением времени оплавления. Однако против повышения температуры нагревателя выступают два фактора. При повышенных температурах на границе контакта нагреватель – полимер возможно разложение полимера с выделением летучих составляющих, вследствие чего в сварном шве появляются поры. С другой стороны, скорость оплавления возрастает до определенного момента, свыше которого процесс оплавления переходит в квазистационарный период (рис.2) [7], при этом, чем больше температура нагревателя, тем раньше он наступает. В связи с этим на практике для увеличения глубины проплавления при сварке толстостенных труб для уменьшения процесса порообразования на расплаве снижают температуру нагревателя и увеличивают время нагрева.

Рис. 2. Кинетика оплавления при контактном нагреве в зависимости от температуры нагревателя: $v_{оп}$ – скорость оплавления; t_{y1} , t_{y2} – время наступления квазистационарного (установившегося) процесса оплавления

В работе [8] было отмечено, что увеличение глубины проплавления при сварке труб толщиной даже в 35 мм приводит к дополнительному смещению потоков расплава, связанные с действием сил тяжести, что особенно заметно на верхней и нижней частях стыка по размерам образующегося грата. В этих областях нижние gratы имеют увеличенный размер, а верхние gratы – уменьшенный размер из-за того, что поток расплава с окисленным поверхностным слоем расплавленных торцов под действием силы тяжести не достигает внешней поверхности стенки трубы. Механические испытания образцов, вырезанных из различных точек окружности по сечению толщины стенки трубы показали существенное отличие условий образования соединения в области верхней и нижней частях стыка.

В связи с этими проблемами сварки толстостенных полимерных труб в Институте проблем нефти и газа СО РАН разработана оригинальная технология сварки толстостенных полиэтиленовых труб, которая исключает повышение температуры нагревателя и большую глубину оплавления свариваемых торцов трубы. В начале производства сварки встык нагретым инструментом, после операции торцевания свариваемых концов полимерной трубы, прилагаемый к сварочному оборудованию торцеватель с гладкими ножами заменяется на другой торцеватель, в котором вместо гладких ножей имеются ножи для вырезания канавки в середине торцов свариваемых труб. Для исключения образования центров концентрации напряжений на углах дна канавки, режущий конец ножей представляет собой полукруг. Вторым торцевателем вырезают канавку с заданной глубиной, обеспечивающей размещение поверхностного оксидного слоя со средней части поверхностей торцов (Рис. 3). Затем производится сварка встык согласно инструкции, но время нагрева должно соответствовать времени нагрева трубы в два раза уменьшенной толщины стенки, так как увеличения глубины проплавления не требуется в связи с тем, что часть расплава, находящаяся у стенок трубы выдавится наружу, а часть расплава, выдавливаемого при давлении осадки, вместо выхода наружу заполнит канавки, вырезанные на середине плоскостей торцов соединяемых труб.

Рис. 3. Схема расположения канавки на торце трубы

На рисунке 4 приведены сваренные соединения по принятой и предлагаемой технологиям, где видно, что наличие канавки на торцах труб приводит к уменьшению образующегося грата.

Рис. 4. Сварные соединения полиэтиленовых труб ПЭ100 SDR9 110×12,3: а) без канавки; б) с канавкой на торцах труб

Таким образом, предварительное вырезание канавки в середине торцов свариваемых труб приводит двухкратному уменьшению времени нагрева, что уменьшает риск порообразования на сварочном шве соединяемых труб и к уменьшению глубины проплавления, что приводит к предотвращению смещения потока расплава под действием силы гравитации.

Работа выполнена в рамках Госзаказа Министерства науки и высшего образования РФ (№ 0377-2018-0001)

***

1. Дубровкин С.Д. Применение пластмассовых труб в строительстве и городском хозяйстве Финляндии. М., изд. ГосИНТИ, 1970, 58 с.
2. Зайцев К.И., Истратов И.Ф., Ляшенко В.Ф. Сварка пластмассовых трубопроводов. М., “Недра”, 1974, 72 с.
3. Патент РФ 171307 Устройство для гидроизоляции стыковых соединений. 29.05.2017. Бюл. № 16.
4. Патент РФ 171308 Устройство для гидроизоляции стыковых соединений. 29.05.2017. Бюл. № 16.
5. Патент РФ 2188913 Устройство для гидроизоляции стыковых соединений. 10.09.2002. Бюл. № 25.
6. Патент РФ 159848. Негорючий покровный слой с адгезионной пленкой. 20.02.. Бюл. № 5.
7. Сварка полимерных материалов: Справочник/Под общ. ред. К.И.Зайцева, Л.Н.Мацюк. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
8. Соколов В.А., Мирошниченко О.М. Технология сварки полиэтиленовых газопроводов с рабочим давлением до 1,2 МПа // Современные проблемы машиностроения: Сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции / под ред. А.Ю. Арляпова, А.Б. Кима; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 368 с.

Губайдуллина Р.А.

Особенности использования метода аэрофототопографической съемки при деформационном мониторинге

*Санкт-Петербургский горный университет
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-175

idsp: ljjournal-12-2018-175

Аннотация

В данной статье приведены рекомендации по составлению проекта работ, позволяющие адаптировать метод аэрофототопографической съемки для оценки устойчивости откосов карьеров и отвалов. Проведены экспериментальные измерения,

на основании которых изучено влияние основных источников ошибок и предложена методика повышения точности определения координат деформационных марок.

Ключевые слова: карьер, деформации, мониторинг, беспилотный летательный аппарат, аэрофотограмметрия

Одной из основных работ, проводимых в процессе эксплуатации горнотехнических сооружений, является своевременное выявление деформаций. Основным регламентирующим документом при проведении работ по наблюдениям за деформациями бортов карьера является инструкция [1], разработанная в 1970 году. Как известно, данную задачу можно решить, как при помощи традиционных методов, описанных в инструкции [1], так и с применением современных дистанционных методов [2,4]. В работе приведены особенности аэрофотограмметрического метода с применением беспилотного летательного аппарата. На данный момент беспилотные летательные аппараты применяются на карьерах при решении только двух упомянутых задач – картографирование территории [6] и сбор необходимой информации для расчета объемов открытой горной выработки [5]. Выбор метода обусловлен тем, что он имеет ряд преимуществ: высокая производительность, наглядность, малый объем полевых работ, возможность автоматизации процесса обработки данных. Существенным недостатком метода является недостаточная точность, что не позволяет использовать его в целях мониторинга деформаций. Согласно отечественным нормативным документам точность наблюдения за деформациями бортов карьера устанавливается для каждого месторождения индивидуально и зависит от физических и механических свойств породы, вида трещиноватостей, конфигурации горного массива и других факторов [1]. Несмотря на это, точность определения координат точек открытой горной выработки при деформационном мониторинге не должна превышать нескольких мм для скальных пород и 1-2 см для песчаных. Однако, если учесть и ослабить влияние ошибок, возникающих при реализации метода, можно значительно повысить точность определения координат.

Актуальность исследования обусловлена тем, что использование данного метода позволит сократить объем полевых и камеральных работ, что существенно уменьшит их стоимость и позволит решить поставленную задачу быстрее и проще.

Основной особенностью при выполнении мониторинга деформаций методами аэрофототопографической съемки является необходимость соблюдения неизменности не только элементов ориентирования, но и условий фотографирования. В первую очередь на это влияет освещенность объекта, то в какое время дня будет выполняться съемка, под каким углом будут падать солнечные лучи, наличие теней на объекте, состояние атмосферы, скорость ветра и т.д. Поэтому все циклы съемок должны выполняться примерно при одних и тех же условиях внешней среды и в одно и то же время суток. При составлении проекта работ необходимо учитывать расположение объекта относительно солнца. Съемка против солнца не допускается.

Кроме того, при планировании работ необходимо учитывать, что обычно БЛА оснащают метрическими камерами, а это значит, что элементы внутреннего ориентирования неизвестны – камеру необходимо откалибровать и вычислить их. Некоторые программные продукты имеют функцию самокалибровки (определяют элементы внутреннего ориентирования и дисторсии объектива по известным координатам опорных точек).

Проектирование работы начинается с выбора съемочной аппаратуры (исходя из требуемой точности измерений). Далее рассчитывается величина GSD (разрешение точки на местности) по формуле (1):

$$GSD = \frac{H}{F} [M/пкс], \quad (1)$$

H – высота фотографирования, м

F – фокусное расстояние в пикселях.

При выборе беспилотного летательного аппарата необходимо учитывать, что при аэрофотосъемке он должен удовлетворять следующим требованиям: обладать достаточно высокой продольной, поперечной и курсовой устойчивостью; быть оснащенным современной навигационной аппаратурой (GPS или IMU) и гиросtabilизирующей установкой, управляемой рамкой для наклона камеры перпендикулярно снимаемому объекту; иметь достаточную дальность полета; управляться в полуавтоматическом режиме; иметь достаточную скорость и грузоподъемность.

Как правило, беспилотные летательные аппараты очень легкие и на них оказывает большое влияние ветер, вследствие чего дрон может отклоняться от маршрута. С целью устранения шарнирного эффекта и последующей связки моделей, при проектировании перекрытия снимков следует увеличить - продольное перекрытие принимать равным 90%, а поперечное - 70%.

Что касается самой технологии съемки карьера, то съемку уступов необходимо выполнять строго отвесным лучом, а зону откоса – наклонным, (перпендикулярно к снимаемой поверхности), причем угол, на который необходимо наклонять камеру, зависит от угла откоса карьера и должен быть равен ему. В целях обеспечения необходимого перекрытия снимков, крайние маршруты (в зоне стыка откоса и борта карьера) проектируются в обоих случаях за границами съемочного объекта. Именно эти перекрытия позволяют связать две модели.

Таким образом, согласно описанным выше рекомендациям были выполнены экспериментальные наблюдения за деформациями на карьере Preg, Австрия. Метод был реализован с использованием гексакоптера Tarot Frame, DJI NAZA M V2, специально подобранных кодовых марок и камеры Sony Alpha 6000 с постоянным фокусным расстоянием 15 мм. Съемка выполнялась в утреннее время до обеда, примерно с 9 до 12 часов дня в светлую, но не солнечную погоду (при наличии облаков). Перед фотографированием на объекте были закреплены опознаки в соответствии с проектом. Координаты опорных точек определены геодезическими методами. Съемки карьера производились дважды – в 2015 и 2016 годах. В результате наблюдений были получены снимки с разрешением 6000×4000 пикселей. Они обрабатывались в программе Агисофт. Точность измерений оценивалась по величине средней ошибки результатов измерений и вычислялась как среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений от истинной величины (геодезических измерений) по формуле:

$$m = \frac{[\Delta]}{n}, \quad (2)$$

где Δ - отклонение от истинного (геодезические измерения), n – количество точек.

С целью регистрации изменений, произошедших за год, были построены и сравнены облака точек 2015 и 2016 годов в программе Cloud Compare. Изменение координат точек, расположенных в нижней части откоса и на нижнем уступе (где расположены опорные и контрольные точки), сопоставимо с полученной точностью измерений. Следовательно, координаты точек, расположенных в этих зонах, не изменились с течением времени.

Координаты контрольных точек были сравнены между собой и с исходными координатами. В результате вычислений средняя ошибка определения координат контрольных точек в плане составила 5,2 см, а по высоте 1,9 см. Согласно упомянутым выше нормативным документам, такая точность неудовлетворительна для решения задач деформационного мониторинга откоса карьера, но ее вполне достаточно для выполнения наблюдений за отвалами. Следовательно, для задач деформационного

мониторинга откосов карьера необходимо повысить точность определения координат деформационной марки, например, путем устранения ряда систематических ошибок, например, совершенствование конфигурации съемочного обоснования, измерение снимков в автоматическом режиме (в автоматическом режиме по кодовым маркам точность – 0,02 пкс, в ручном – 0,5 пкс [3]).

В заключение важно отметить, что при решении задач деформационного мониторинга методом аэрофотограмметрической съемки необходимо соблюдать следующие рекомендации: важно обеспечить постоянство условий съемки; тщательно подбирать программы обработки снимков - предпочтение стоит отдать программным продуктам, обладающим функциями самокалибровки камеры и имеющим функцию автоматизированного измерения снимков; особое внимание следует уделить составлению проекта работ, в частности построению съемочного обоснования. Точность данной методики может быть улучшена, путем устранения систематических погрешностей, совершенствования конфигурации съемочного обоснования.

***

1. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов, уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости / Министерство угольной промышленности СССР ВНИМИ. – Л.: ВНИМИ, 1971. – Глава 3.
2. Кольцов, П.В. Методика безотражательных наблюдений за деформирующимися участками бортов карьеров и отвалов / Записки Горного института. – Спб. - 2012. – С. 68.
3. Корнилов, Ю.Н., Боголюбова, А.А. О точности измерений цифровых снимков / Известия высших учебных заведений «Геодезия и аэрофотосъемка». -2016. - №2. – С.17-21.
4. Новаковский, Б.А., Пермяков, Р.В. Цифровая наземная стереосъемка возможности и перспективы / Геодезия и картография. – 2014. - №10. – С. 37-40.
5. Чередеев, Г.С. Применение беспилотных летательных аппаратов для быстрого получения ортофото съемки, 3D-модели местности и расчет объемов в маркшейдерском деле / XII Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии при недропользовании». – Сборник научных трудов. – Спб. - 2016 - С. 30- 31.
6. Filipova, S., Filipov, D., Raeva, P. Creating 3D model of an open pit quarry by UAV imaging and analysis in GIS / International conference on cartography and GIS. – Albena, Bulgaria. – 2016. - С. 651-656.

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В.

Разработка «цифрового двойника» токарного станка с ЧПУ

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-176

idsp: ljjournal-12-2018-176

Аннотация

В статье рассмотрена возможность получения «цифрового двойника» токарного станка с ЧПУ с использованием нейросетевых моделей системы резания. Обучение искусственных нейронных сетей происходило на основе экспериментальных данных полученных в ходе производственных испытаний. В качестве основных выходных критериев при моделировании использовались: амплитуда и информационная энтропия сигнала виброакустической эмиссии (ВАЭ), фрактальная размерность аттрактора динамической системы резания, значения сил при резании и шероховатость обработанной поверхности. Показана возможность оптимизации режимов обработки с использованием «цифрового двойника» токарного станка с ЧПУ.

Ключевые слова: цифровой двойник, машинное обучение, искусственные нейронные сети, цифровое производство, промышленный интернет вещей, большие данные, станки с ЧПУ, кибер-физические системы

Интенсивное внедрение цифровых технологий, основанных на современных подходах машинного обучения (ML), системах промышленного интернета вещей (IIoT) и интеллектуальной обработки больших данных (Big Data и Data Mining), обуславливает развитие принципиально новых технологических объектов - кибер-физических систем и их цифровых двойников.

Кибер-физическая система (КФС) - это основная технологическая единица "цифрового" производства, характеризующаяся высокими адаптивными и интеллектуальными возможностями за счет ассоциативного восприятия информации и постоянного обучения, оценки текущего состояния и прогнозирования будущего, способностей автономно решать задачи оптимизации и принимать правильные решения на основе анализа многомерных данных, учитывая различные, зачастую скрытые факторы реального производства [1,2]. Основной задачей при организации КФС является создание "цифровых" двойников. Цифровым двойником является ансамбль математических моделей характеризующих различные состояния оборудования, технологических и бизнес процессов во времени, в соответствии с текущими производственными условиями, а также детализированные сборочные 3D модели объектов, отражающие связи и взаимодействия между узлами. Однако в настоящее время цифровые двойники в основном разработаны для ведения бизнеса, имеются также примеры успешно работающих двойников в нефте- и газовой промышленности. Двойники для механообрабатывающих производств недостаточно развиты.

Получение "цифровых" двойников возможно, как с использованием традиционных аналитических подходов, основываясь на математическом описании физических процессов, так и с использованием современных статистических методов, в том числе машинного обучения.

В настоящее время существует большое множество методов машинного обучения используемых для построения статистических моделей, однако их можно отнести к трем основным группам: модели регрессионного анализа, модели классификации и модели выявления аномалий [3].

Выбор конкретного метода машинного обучения зависит от размера, качества и природы данных, а также от типа решаемых задач. Существующие методы машинного обучения требуют различных вычислительных мощностей и обладают различной степенью точности. Как правило, это сводится к возможности наиболее точной аппроксимации данных и выявлению границ в пространстве данных. Наиболее универсальным и точным методом, способным работать с большим количеством данных и строить нелинейные зависимости, являются искусственные нейронные сети (ИНС). Нейронные сети используют большое количество параметров настройки, что позволяет создавать высокоточные модели процессов работающих в режимах регрессионного анализа, классификации и выявления аномалий. К недостатком ИНС можно отнести высокие требования к вычислительным ресурсам на этапе обучение. Большое количество переменных и собранных данных могут привести к значительному времени обучение нейросетевых моделей.

С учетом вышесказанного, был разработан комплекс статистических моделей использующих машинное обучение. Полученные модели являются основой для "цифрового двойника" токарного станка с ЧПУ и позволяют решать задачи регрессионного анализа для прогнозирования динамики процесса резания для различных условий обработки, шероховатости обработанной поверхности и сил при резании. Процесс создания цифрового двойника представлен на рисунке 1.

Обучающая выборка была получена на основе сбора телеметрических данных, в процессе механической обработки с использованием распределенной системы датчиков сигнала виброакустической эмиссии, динамометра и технологии

промышленного интернета вещей (IIoT). Количество используемых датчиков, их тип и пространственная ориентация определялась в соответствии с компоновкой оборудования. Наличие в системе большого числа датчиков с различной пространственной ориентацией объясняется неоднородностью материалов и конструкций в разных направлениях, особенностями распространения сигналов, а также возможностью перестройки колебательной системы в процессе эксплуатации. Таким образом, использование гетерогенной системы сенсоров позволило получить наиболее полную динамическую картину процессов в n -мерном пространстве "состояние-время". В качестве протокола приема-передачи данных в рамках сети промышленного интернета вещей был использован стандартный протокол TCP/IP, а также текстовый формат передачи обмена данными JSON (JavaScript Object Notation). Для предварительной обработки сигналов были использованы аналоговые и цифровые полосовые фильтры, а также Wavelet фильтры. Использование Wavelet фильтров позволило исключить влияние шумовой составляющей в сигналах ВАЭ и осуществлять декомпозицию на периодическую и хаотическую составляющую на основе энтропийных показателей. Предварительная обработка данных осуществлялась на "пограничном" устройстве (Edge), вычисляющее значения параметров сигнала ВАЭ и формирующее пакеты данных для отправки в виртуальное облачное хранилище. При построении математических моделей, на основе методов машинного обучения, необходимо структурирование и разметка данных. Однако учитывая особенности технологии работы IIoT, построение реляционных БД не всегда возможно, поэтому был применен подход на основе технологий NoSQL. Для этого хранение и обработка данных была реализована на виртуальном сервере имитирующем работу вычислительного кластера. На данном виртуальном сервере была развернута специальная распределенная, масштабируемая файловая система. В качестве основы были использованы свободно распространяемые утилиты, библиотеки и фреймворки проекта Hadoop, являющейся одной из наиболее успешной и общепринятой технологией "Больших данных", в частности распределенная файловая система HDFS и база данных HBase под управлением программной оболочки Hadoop Common [4].

Рисунок 1 – Создание цифрового двойника станка с ЧПУ

Для осуществления распределенных вычислений и обработке больших объемов данных была использована система MapReduce, обеспечивающая автоматическое распараллеливание и распределение задач на кластере. Для ускорения времени обучения нейросетевых моделей использовались графические процессоры nVidia CUDA.

Для создания статистической модели динамического состояния процесса резания, была выбрана рекуррентная ИНС с сигмоидальной функции активации

нейронов. В качестве обучающей выборки были использованы данные полученные в ходе работы промышленного оборудования. Обучение производилось с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. После окончания процесса обучения проводилась верификация полученной модели, на основе рассчитанных значений средней квадратичной ошибки.

В итоге полученная ИНС (рис.2) состоит из 13 основных нейронов во входном слое, на которые поступает информация о векторе технологических параметров, и дополнительных нейронов, на которые поступают значения вектора предыдущего динамического состояния с выходных нейронов. Тем самым нейросетевая модель учитывает текущие условия обработки, а также предыдущее динамическое состояние процесса резания.

Рисунок 2 - Нейросетевая модель динамической устойчивости процесса резания

Выходной слой состоит из 4 основных нейронов, которые характеризуют вектор текущего динамического состояния процесса резания, содержащий сведения об амплитуде автоколебаний, фрактальной размерности аттрактора, энтропии сигнала, старшего показателя Ляпунова и ряда дополнительных нейронов, каждый из которых отвечает за определенную частоту в спектре сигнала ВАЭ. Промежуточные нейроны образуют 2 скрытых слоя. Полученная нейронная сеть способна моделировать динамическое состояние процесса резания в различные моменты обработки.

Оценка качества полученной модели осуществлена на основе моделирования обработки на токарном станке заготовки из стали 12Х18Н10Т установленной в центрах, проходным резцом с режущей частью из твердого сплава ВК 6 (рис. 3, а) Режимы обработки были определены в соответствии с имеющимися производственными нормами для обработки деталей данного типа на токарном станке с ЧПУ. В качестве переменной составляющей вектора St_m , была выбрана величина Z – положение суппорта станка по оси Z мм, которая изменялась с шагом 0.01 мм от 0 до 350 мм. Такой прием позволил сформировать вектор S_{dm} на всем протяжении обработки заготовки. Всего было смоделировано 35 000 динамических состояний процесса резания.

По окончании нейросетевого моделирования была построена спектрограмма, отражающая амплитуду и частоту колебаний, а также определены фрактальные размерности аттракторов. На полученной в ходе нейросетевого моделирования

спектрограмме (рис. 3б) заметны две доминирующие частоты колебаний 3,5 кГц и 6,5 кГц и два фазовых перехода. Для оценки адекватности полученных результатов, была произведена обработка заготовки с идентичным вектором технологических параметров St с регистрацией сигнала ВАЭ. После обработки сигнала ВАЭ была получена спектрограмма и реконструированы аттракторы (рис. 3а). На данной спектрограмме аналогично наблюдается две доминирующие частоты в областях 3,5 кГц и 6,5 кГц и фазовых перехода. Сравнение результатов натурного эксперимента с результатами нейросетевого моделирования позволяют судить о высокой степени адекватности полученной нейросетевой модели. Максимальная погрешность моделирования не превышает 3,6%. Как видно из рисунка 3, предложенные производственные нормы не позволяют получить изделие заданного качества, что в свою очередь может привести к риску возникновения брака, а учитывая биения заготовки и к поломке инструмента.

Рисунок 3 - Результаты нейросетевого моделирования

(а - схема обработки, б - моделируемый процесс резания, в - реальный процесс резания, г - процесс резания после оптимизации)

Для корректировки режимов заложенных в нормах производства, был произведен расчет оптимальных значений вектора Stm на основе дополнительного нейросетевого моделирования. Для этого в качестве переменных значений вектора Stm были выбраны: V , f_y , а критериями оптимальности: амплитуда колебаний и фрактальная размерность аттрактора. Оптимальными считались те значения вектора Stm при которых амплитуда колебаний и фрактальная размерность были минимальными. В ходе моделирования, по всей длине обработки формировалось пространство динамического состояния процесса резания, точки которого соответствовали различным значениям вектора Stm, а определение оптимальных

значений изменяемых параметров, соответствующих минимуму целевых функций, осуществлялся с использованием методов многомерной оптимизации - симплекс-метода (метод деформируемого многогранника). После окончания процессов моделирования и оптимизации были выбраны новые значения вектора Stm отвечающие минимумам значений целевых функций - $V = 90$ м/мин, $S = 0.1$ мм/об, $f_\gamma = 0,2$ мм.

Для проверки полученных результатов была проведена дополнительная обработка прутка из стали 12X18H10T скорректированными режимами обработки и построена спектрограмма. Как видно из полученной спектрограммы (рис. 3, г) оптимизация условий обработки позволила снизить значение амплитуды колебаний в 2 раза и обеспечить устойчивое протекание процесса резания, о чем свидетельствует значение фрактальной размерности $Df = 1.1$. Таким образом, повышалось динамическое качество механической обработки, без потери производительности.

Аналогичным образом были получены модели для прогнозирования значений шероховатости обработанной поверхности и сил при резании (рис.4).

Рисунок 4 – Нейронные сети шероховатости поверхности (а) и сил резания (б)

Силы резания определяют точность обработки, вызывая упругое отжатие детали и инструмента, а следовательно, и погрешность формы детали. Данные нейросетевые модели представляют собой многослойные искусственные нейронные сети прямого распространения.

Входом ИНС прогнозирования шероховатости обработанной поверхности (рис.4а) являются 5 нейронов характеризующих значения: V - скорости резания (м/мин), S - подача (мм/об), t - глубина резания (мм), r - радиус при вершине (мм), вспомогательный угол в плане $-\phi_1$. Нейронная сеть состоит из двух скрытых слоев. Выходом ИНС является численное значение шероховатости R_a .

Входом ИНС прогнозирования силы резания (рис.4б) являются 4 нейрона характеризующих значения: V - скорости резания (м/мин), S - подача (мм/об), t - глубина резания (мм), σ - предел прочности материала (МПа). Выходом ИНС является численное значение шероховатости R_a .

Применение данных математических моделей в составе “цифрового двойника” возможно не только в реальных производственных условиях, но и на этапе выбора и обоснования закупки оборудования потребителем, что позволяет осуществлять подбор оптимальных характеристики оборудования и отладку планируемого технологического процесса на “цифровых двойниках”.

Использование “цифровых” двойников оборудования на этапе планирования производства позволяет выявить наиболее узкие места в технологических операциях,

повысить качество продукции и снизить риски поломки инструмента и нештатной работы оборудования.

***

1. Искусственный интеллект и кибер-физические механообрабатывающие системы в цифровом производстве: монография / Ю.Г. Кабалдин [и др.]; под ред. Ю.Г. Кабалдина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – 271 с.
2. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Серый С.В. Диагностика выходных параметров процесса резания в режиме реального времени на основе фрактального анализа и вейвлет-анализа с использованием программно-аппаратных средств National Instruments и Nvidia CUDA // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 80-82.
3. Шитиков В.К., Мастицкий С.Э. (2017) Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. 351 с. – Электронная книга
4. Уайт Т. У13 Nadoop: Подробное руководство. — СПб.: Питер, 2013. — 672 с.:

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М.
Разработка цифрового двойника режущего инструмента для
механообрабатывающего производства

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)

doi: 10.18411/lj-12-2018-177

idsp: ljjournal-12-2018-177

Аннотация

Разработана цифровая модель (двойник) режущего инструмента на основе нейросетевого моделирования. Показано, что разработанные модели позволяют путем варьирования входных данных оптимизировать состав и структуру износостойкого покрытия и определить режимы обработки, обеспечивающие максимальную износостойкость режущего инструмента. Рассмотрены вопросы информационной безопасности.

Ключевые слова: режущий инструмент, нейросетевые модели, цифровой двойник, выбор состава покрытия, оценка интенсивности износа.

Abstract

A digital model (twin) of a cutting tool based on neural network modeling has been developed. It is shown that the developed models allow, by varying the input data, to optimize the composition and structure of the wear-resistant coating and to determine the processing modes that ensure the maximum wear resistance of the cutting tool. Considered issues of information security.

Keywords: cutting tool, neural network models, digital twin, choice of coating composition, assessment of wear intensity.

Механообрабатывающее производство в зависимости от заказов потребителей вынуждено постоянно изменяться и трансформироваться. Каждый год научные исследования указывают нам новые, до сих пор невиданные возможные пути развития производства, особенно с использованием IT-технологий. Имеются долгосрочные глобальные тренды, с указанием конечного результата к которому придет производство.

В области механообрабатывающего производства таким трендом в РФ является программа Индустрия 4.0, которая призвана изменить его, сделать более современным и цифровым. Производство станет более интеллектуальным, гибким, эффективным и прогнозируемым.

В настоящее время на отечественных предприятиях под “цифровизацией” в основном понимают разработку 3D моделей. Однако, на наш взгляд, “цифровизация” – это разработка цифровых моделей, близких к реальным различных производственных процессов, оборудования, других устройств.

Цифровой двойник (digital twin) – новое слово в моделировании оборудования, техпроцессов и планировании производства [1]. Это совокупность цифровых (математических) моделей, достоверно описывающих процессы и взаимосвязи как на отдельном объекте, так и в рамках целого производственного предприятия с использованием анализа больших данных (Big data).

Применение цифрового двойника, являющегося точной копией реального актива, помогает быстро найти наиболее эффективные режимы работы, выявить потенциальные риски, встроить новые технологии в существующие производственные линии, сократить сроки и стоимость реализации проектов. Кроме того, цифровой двойник помогает определить шаги по обеспечению информационной безопасности.

Современные технологии дают возможность построить цифровые двойники абсолютно любых производственных предприятий, будь то машиностроительный завод или металлургическая компания [2]. В будущем эти технологии позволят удаленно управлять всем производственным процессом в режиме реального времени. На базе цифрового двойника можно объединить все системы и модели, используемые для планирования и управления производственной деятельностью, что повысит прозрачность процессов, точность и скорость принятия решений.

В этой связи, цифровой двойник можно рассматривать как электронный паспорт оборудования, его цифровую идентичность, а также режущего инструмента и в целом механообрабатывающего предприятия, в котором фиксируются все данные о обрабатываемых материалах, произведенных технологических операциях, испытаниях и тестовых исследованиях.

Это значит, что вся информация, начиная с 3D модели и технологии производства, заканчивая правилами техобслуживания, утилизации и т.д., будет оцифрована и доступна для считывания устройствами и людьми. Такой принцип позволяет отслеживать, подобно технологии блокчейн, все происходящие последовательные действия над ним, и гарантировать качество продукции.

Важной особенностью цифрового двойника, например, оборудования, или техпроцесса, является то, что для задания на него входных воздействий используется информация с датчиков реального устройства, работающего параллельно [3]. Работа возможна как в онлайн, так и в офлайн режимах. Далее возможно проведения сравнения информации виртуальных датчиков цифрового двойника с датчиками реального устройства, выявление отклонений (брака) и причин их возникновения.

Главная задача двойника — дать возможность управлять всеми факторами, влияющими на стоимость и качество продукта ещё до начала его производства. Цифровые двойники, прежде всего, создаются, чтобы существенно ускорить сроки вывода новых изделий на рынок путем моделирования, потому позволяют представить все этапы его жизненного цикла в виртуальной среде.

Ещё одна функция цифрового двойника — это наследование данных об изделии при создании его новых модификаций. Другими словами, максимальное использование предыдущего опыта проектирования, изготовления и испытаний при разработке новых изделий.

В этой связи, “цифровизация” машиностроительного производства — это в том числе и отработка ситуаций на виртуальных цифровых моделях, которая позволяет экономить денежные и материальные средства. Ряд крупных фирм за рубежом, уже сейчас, не дожидаясь поступления металлорежущего оборудования для производства деталей, получив его виртуальный образ, начинает отладку

технологических процессов, не теряя времени. С появлением Интернета вещей (IoT), цифровых датчиков, параллельных вычислений и развитых беспроводных технологий, идея цифровых двойников получила право на жизнь и в плане финансовой доступности, и в плане вычислительных возможностей сбора и анализа больших данных. Поэтому предприятия уже внедрившие IoT, параллельно используют и технологии цифровых двойников. Однако в настоящее время цифровые двойники в основном разработаны для ведения бизнеса, имеются также примеры успешно работающих двойников в металлургической промышленности [2]. Двойники для механообрабатывающих производств отсутствуют.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработана единая базовая платформа расширения функциональных возможностей различных систем ЧПУ технологического оборудования на базе встраивания в них нейро-модулей, применения высокопроизводительных параллельных вычислений, промышленного интернета и глубокого обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) с использованием технологий nVidia CUDA [3,5-10].

Искусственный интеллект трактуется сегодня как системы, которые могут понимать, прогнозировать и потенциально способны функционировать без участия человека, т.е. создавать уже не «безлюдные», а «умные» производства. Системы (алгоритмы) ИИ могут реагировать на голосовые команды, а также самообучаться и выдавать готовые решения, обеспечивая информационную безопасность, используя их обучение на основе криптографии.

Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой новую перспективную вычислительную технологию, дающую новые подходы к исследованию задач цифрового производства [4]. Первоначально нейронные сети открыли новые возможности в области распознавания образов, затем к этому прибавились статистические и основанные на методах искусственного интеллекта средства поддержки принятия решений для задач в различных областях техники.

Способность к моделированию различных процессов, устройств и приборов, работе с зашумленными данными и адаптивность дают возможности применять нейронные сети для решения широкого класса задач. Приложения нейронных сетей охватывают самые разнообразные области интересов: распознавание образов, обработка зашумленных данных, дополнение образов, ассоциативный поиск, классификация, оптимизация, прогноз, диагностика, обработка сигналов, абстрагирование, управление процессами, сегментация данных, сжатие информации, сложные отображения, моделирование сложных процессов, машинное зрение, распознавание речи и т.д.

Нейронные сети могут иметь различные архитектуры. Можно выделить три основных типа нейронных сетей [4]:

- полносвязные сети (рис. 1.2, а),
- многослойные сети (рис. 1.2, б),
- слабосвязные сети (нейронные сети с локальными связями) (рис. 1.2, в, г).

Рис. 1. Основные типы нейронных сетей:

а – полносвязная сеть; б – многослойная сеть; в, г – слабосвязные сети

В слабосвязных сетях нейроны располагаются в узлах прямоугольной решетки. Каждый нейрон связан с четырьмя или восемью своими ближайшими соседями. В полносвязной сети каждый нейрон связан со всеми остальными (на входы каждого нейрона подаются выходные сигналы остальных нейронов). В многослойных сетях нейроны объединяются в слои. Слой – это совокупность нейронов с единым входным сигналом. Внешние входные сигналы подаются на входы нейронов первого слоя, а выходами сети являются выходные сигналы последнего слоя. Кроме входного и выходного слоев в многослойной нейронной сети, есть один или несколько промежуточных (скрытых) слоев.

Процесс функционирования ИНС, то есть сущность действий, которые она способна выполнять, зависит от величин синаптических связей, поэтому, задавшись определенной структурой ИНС, разработчик сети должен найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов [4,3,5].

Этот этап называется обучением ИНС, и от того, насколько качественно он будет выполнен, зависит способность сети решать поставленные перед ней задачи во время эксплуатации. На этапе обучения кроме параметра качества подбора весов важную роль играет время обучения. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью и их приходится выбирать на основе компромисса. Существует ряд методов обучения ИНС: с учителем, без учителя. В последние годы разработано новые архитектуры ИНС (сверточные) и способы их обучения, в частности глубокое обучение ИНС [5]. Таким образом, “цифровым” двойником может являться комплекс статистических моделей использующих различные комбинации методов машинного обучения и прошедших различные стадии верификации и улучшения.

Применение подходов ИНС к решению задач в области машиностроения нами начато в конце девяностых годах [3]. Однако отсутствие ЭВМ с большими вычислительными возможностями, отсутствие больших данных существенно тормозило их применение к решению вышеперечисленных проблем. Задача широкого внедрения цифровых технологий в настоящее время, основанных на современных подходах машинного обучения (ML), системах промышленного интернета вещей (IIoT) и интеллектуальной обработки больших данных (Big Data и Data Mining), обуславливает развитие принципиально новых электронных моделей оборудования, процессов и их цифровых двойников.

Как показали исследования [5], нейронносетевую модель оборудования, режущего инструмента и т.д. можно рассматривать как электронную модель, так и как цифровой двойник, поскольку на вход нейронной сети можно вводить характеристики обрабатываемого материала, параметры технологических процессов и т.д.

На рис. 2 приведена схема получения цифрового двойника инструмента, включающая сбор данных для построения нейронной сети на основе облачных технологий [5].

Рис.2 Схема построения цифрового двойника

Как указывалось выше, в общем случае цифровой двойник-это многофакторная электронная модель оборудования, инструмента и других их элементов, включающая ансамбль электронных моделей, т.е. нейронносетевых моделей, некоторые из которых являются определяющими. Для режущего инструмента с износостойким покрытием-это нейронная сеть прочности инструмента (рис. 1), нейронная сеть его износостойкости и нейронная сеть выбора оптимального состава и структуры износостойкого

наноструктурного покрытия. Применение данных математических нейронносетевых моделей в составе “цифрового двойника” возможно не только в реальных производственных условиях, но и на этапе выбора и обоснования закупки инструмента потребителем.

Таким образом, появляется возможность заменить сложную многомерную функциональную зависимость, например, износостойкости режущей части инструмента нейронносетевой структурой. Иначе говоря, использование нейросетевого имитационного моделирования контактных процессов при резании позволяет сформировать «виртуальный» датчик для оценки интенсивности J изнашивания режущего инструмента. Исследования показывают [5], что интенсивность J изнашивания твердых сплавов с покрытием определяются силой F_3 трения на контактной площадке, скоростью перемещения трущихся тел (прирезцовых слоев стружки и передней части инструмента) и прочностью межатомных связей в зернах тугоплавких соединениях покрытия, которая характеризуется их удельной предельной энергией разрушения ΔE_{np} :

$$J = \frac{L \cdot F_3}{\Delta E}, \quad (1)$$

где L – путь резания.

При вычислении интенсивности износа в реальных условиях механической обработки наибольшее затруднение вызывает определение величины силы F_3 трения. Для нахождения силы трения расчетным путем проводится на основе измерений ряда характеристик в процессе резания.

На практике такой метод нахождения F_3 означает периодическую остановку процесса резания для определения длины контакта C путем трудоемких оптических измерений остаточного следа стружки (которые к тому же сложно выполнить непосредственно на станке) и, поэтому, совершенно непригоден в автоматизированном производстве.

Значения F_3 для некоторых инструментальных материалов можно рассчитать, используя известные зависимости сил трения и температур [4]. Но в этом случае возникает необходимость использования на металлорежущем станке датчиков для качественного измерения температуры и вычисления множества температурных поправок, связанных с тем, что термодатчики практически невозможно разместить в зоне резания.

Выходом из этой ситуации является использование в качестве температурного датчика естественной термопары, образующейся на участке непосредственного соприкосновения инструмента и детали. Естественно, что параметры такого датчика не статичны, а динамическим образом зависят от площади контакта твердосплавного инструмента и стружки, то есть, в конечном счете, зависят от силы трения F_3 , для которой выражение можно переписать в виде:

$$F_3 = \tau_F \cdot S_F, \quad (2)$$

где τ_F – касательные напряжения.

Экспериментальные исследования показывают, что выходной параметр естественной термопары U_t – термо-ЭДС является функцией от скорости резания [6]. Таким образом, интенсивность изнашивания режущего инструмента можно представить в виде зависимости трех аргументов:

$$J = f(U_t(F_3, v), v, \Delta E_{np}), \quad (3)$$

где f – неизвестный функционал, определяемый по экспериментальным данным.

По исходным данным строим нейронную сеть. Для нахождения f используем двухслойную (имеющую два слоя активных нелинейных элементов) нейронную сеть обратного распространения [5].

Поиск оптимальной структуры нейронной сети проводился путем имитационного моделирования при помощи пакета программ Matlab 6. В результате моделирования было рассмотрено несколько структур нейронных сетей с различными преобразующими функциями нейронов. Их обучение проводилось на обучающей выборке, полученной путем проведения серии однофакторных экспериментов по точению стали 45 и твердосплавными пластинками с покрытием на различных режимах резания. За оптимальную принята структура сети, дающая наименьшую максимальную ошибку за определенный период времени обучения.

Рис. 3. Структура нейронной сети оценки износостойкости инструмента

Как показали расчеты, имеется скорость резания V , при которой J является минимальной.

Структура оптимальной нейронной сети представлена на рис.3. Первый слой сети содержит 6 нейронов, второй, выходной слой состоит из одного нейрона. В качестве функции активации нейронов обоих слоев используется экспоненциальный сигмоид.

Построенная нейронная сеть (рис.4) для выбора структуры и состава износостойкого покрытия - сеть прямого распространения (Feed Forward).

Рис. 4 – ИНС прямого распространения

На вход подаются следующие параметры: V , м/мин – скорость резания; S_0 , мм/об – подача на оборот; t , мм – глубина резания; HV_{OM} – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу).

На выходе: HV_{μ} – микротвердость износостойкого покрытия.

На рис.5 представлена зависимость твердости обрабатываемого материала от микротвердости износостойких покрытий.

Рис. 5. Зависимость микротвердости износостойкого покрытия от твердости обрабатываемого материала

Анализ рис.5 показывает, что имеется линейная зависимости микротвердости покрытия от твердости обрабатываемого материала (ОБ), т.е. чем выше твердость ОБ, тем выше должна быть микротвердость покрытия, что достигается использованием таких жаропрочных элементов как Zr и многоэлементных покрытий (AlTiN). Можно полагать, что с увеличением базы данных по инструменту появится более широкий выбор и структура покрытий [11, 12].

Таким образом, на основе электронных моделей (двойников), основанных на разработке нейросетевых моделей реального процесса механообработке можно выбрать состав и структуру износостойкого покрытия для режущего инструмента, определять оптимальные режимы резания при обработке того или иного обрабатываемого материала в разрабатываемом технологическом процессе обработки детали. Следовательно, появляется возможность симулировать различные параметры инструмента перед построением технологического процесса, и определять его производительность и себестоимость.

Если рассматривать цифровой двойник не конкретного изделия, а всего производства, то имеется преимущество в возможности симулировать в виртуальной среде все процессы, определении необходимого количества и оптимального расположения оборудования в зависимости от объема и номенклатуры выпускаемых изделий. Цифровой двойник обеспечивает обратную связь между реальным и виртуальным миром, что позволяет оптимизировать процессы изготовления различных деталей, оборудования и тд.

При этом, если цифровой двойник разрабатывается для вновь создаваемого производства, появляется возможность через симуляцию его работы выявить возможные риски и недочёты, скорректировать проект. Цифровой двойник существующего производства позволяет прорабатывать внедрение или изменение технологических процессов без реального вмешательства в работу реального процесса.

***

1. Есть способ лучше: цифровой двойник повышает эффективность процессов конструкторско-технологического проектирования и производства // CAD//CAM//CAE Observer, №3, 2016, С. 36-40.

2. Бурико А.В. Цифровая эволюция, или почему Русал “уходит” в цифру // Цифровое производство, №2, 2017, С. 18-23.
3. Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В. Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта, Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО “Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т”, 2003. – 201 с.
4. Короткий С. Нейронные сети: основные положения, (<http://www.orc.ru/~stasson>).
5. Искусственный интеллект и кибер-физические механообрабатывающие системы в цифровом производстве: монография / Ю.Г. Кабалдин [и др.]; под ред. Ю.Г. Кабалдина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – 271 с.
6. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
7. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Серый С.В. Диагностика выходных параметров процесса резания в режиме реального времени на основе фрактального анализа и вейвлет-анализа с использованием программно-аппаратных средств National Instruments и Nvidia CUDA // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 80-82
8. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и износа инструмента // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 2. с. 47-50.
9. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Вытнов Ю.В., Голубев С.В. Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени на основе подходов нелинейной динамики с использованием NVIDIA CUDA в программной среде LABVIEW // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). с. 114-121.
10. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Лаптев И.Л., Сидоренков Д.А. Разработка динамического паспорта станка на основе нейросетевого моделирования его рабочего пространства с использованием технологии NVIDIA CUDA и подходов глубокого обучения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 10 (679). с. 49-56.
11. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с покрытием. М.: Машиностроение, 1993, - 336 с.
12. Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Шатагин Д.А., Власов Е.Е. Выбор состава и структуры износостойких наноструктурных покрытий для твердосплавного режущего инструмента на основе квантово-механического моделирования. М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 216 с

Кузлякина В.В.¹, Нагаева М. В.²

Инженерное образование – реальность или виртуальность?

¹Дальневосточный федеральный университет

²Дальневосточный рыбохозяйственный университет
(Россия, Владивосток)

doi: 10.18411/lj-12-2018-178

idsp: ljjournal-12-2018-178

Аннотация

В статье рассматривается вопрос о реализации улучшения инженерного образования в России на примере Приморских вузов в свете сверх активного реформирования высшей школы. Резко взят курс на повсеместное внедрение технологии онлайн обучения без учета специфики инженерного образования и имеющейся материально-технической, методической и кадровой базы. Современное инженерное образование должно использовать огромный положительный опыт российской (советской) инженерии и педагогики, применяя новые средства и технологии расчетов и проектирования на основе глубоких знаний в области фундаментальных естественнонаучных и обще профессиональных инженерных дисциплин.

Реальность и виртуальность в образовании, особенно в инженерном, не должны соперничать, а должны гармонично сочетаться и дополнять друг друга. Добиться такого результата «наскоком» за короткое время невозможно! Необходима кропотливая непрерывная работа. Но делать это надо неотлагательно, тем более что задел во многих вузах имеется, следует только внимательно присмотреться и не считать, что только зарубежное, или московское может быть лучшим.

Ключевые слова: инженерное образование, интеграция дисциплин, фундаментальная составляющая, виртуальные лаборатории, модульный принцип, рациональное проектирование.

Инженерное образование претерпевает значительные изменения и в России, и за рубежом. Это связано со многими причинами:

- стремительное развитие науки и техники на рубеже веков;
- смена материально технической базы в исследованиях, проектировании и производстве;
- изменение политической картины мира.

Особенно активные преобразования произошли в этом столетии в России. Проведены десятки конференций, симпозиумов, круглых столов и т.п., принято несколько постановлений на уровне правительства, но... ситуация с инженерным образованием только ухудшается.

Проблемы инженерного образования широко обсуждаются на разных уровнях. Наиболее серьезные публикации по этому вопросу на наш взгляд это: «Инженерное образование в современном мире» [1], «Инженерное образование в России: история и проблемы его развития» [2] и «Мы снова оказались в 1929 году...» [3]. Группой ученых и сотрудников МАДИ, было выполнено исследование на основании «опроса экспертов о состоянии высшей технической школы (ВТШ) в России и других странах мирового сообщества, проведенного в период работы 37-го Международного симпозиума по инженерной педагогике (МАДИ, 15-19 сентября 2008 г.) ... Всего было опрошено 250 респондентов, из них 84 представителя ведущих технических вузов из 22 стран мира ... и 166 участников симпозиума из вузов г. Москвы и регионов России» [1].

Приведем некоторые факты из этой статьи:

1. Ухудшение состояния инженерного образование в 1998 г отметили 68,8% опрошенных.

2. Среди первоочередных мер для повышения качества подготовки специалистов отмечается:

- стабильное финансирование – 79,3 %;
- модернизация материально-технической базы – 70,5 %;
- формирование современной информационной среды – 50,6 %.

3. Оценка статусного положения преподавателя в социальной структуре общества:

- к среднему слою среднего класса относят себя 36,2 %;
- к нижнему слою среднего класса – 34,9 %;
- к высшему классу и верхнему слою среднего класса – только 4,2 %.

4. Престиж профессии преподавателя оценивается: средний – 34,9 %; низкий – 69,7 %, высокий – 0 %.

5. Престиж инженерных профессий считают средним – 53,3%.

6. В целом отмечается соответствие структуры подготовки инженерных кадров текущим и перспективным потребностям экономики России – 78,3 %; качества подготовки специалистов с инженерным образованием требованиям рынка интеллектуального труда – 68,3 %

7. Оценены слабые места в подготовке специалистов-выпускников технических вузов:

- математическая подготовка – 31,3%;
- профессиональная подготовка: общая – 18,7% и специальная – 10,8%;
- компьютерная – 22,3%;
- знание иностранных языков – 75,3%;
- практическая подготовка – 45,8%;

- готовность к самостоятельной работе – 68,1%.

В 2012–18 г.г. ситуация с инженерным образованием выглядит еще плачевнее. Подробное исследование, проведенное в 2012 г., показало: «17 % экспертов признали в инженерном образовании состояние системного кризиса, 36 % – оно в критическом состоянии и 30 % считают, что в инженерном образовании наблюдается стагнация. Удовлетворительную оценку инженерному образованию дали только 17 % экспертов» [2]. В 2016 г. об этом с болью пишет в работе «Мы снова оказались в 1929 году...» академик РАН Кулешов А. [3]. В этих работах и многих других правильно оценивается ситуация с инженерным образованием в России, предлагаются пути решения назревших проблем, хотя по некоторым положениям можно дискутировать. Многолетний опыт работы одного из авторов в производственной сфере (от мастера слесарного участка до инженера технического отдела судоремонтно-судостроительного предприятия и от ассистента до директора института), а также получившего три высших образования: инженерное (очно), экономическое (заочно) и политическое (вечерняя форма обучения) и два высших образования у второго автора позволяет нам компетентно судить о развитии и состоянии высшего инженерного образования.

В послании президента России и его речи на инаугурации отмечается особая роль опережающего развития экономики, технологического прорыва, всестороннего импортозамещения российской продукцией, превосходящей по качеству зарубежную. Это возможно только при условии развития образования и науки, особенно инженерного направления: «инженерное образование в РФ нужно вывести на мировой уровень, сосредоточиться на качестве подготовки кадров, организовать подготовку инженеров в сильных вузах, имеющих прочные связи с промышленностью, и лучше, конечно, в своих регионах» [4]. Однако реализация этой чрезвычайно важной задачи не просто не выполняется, а скорее саботируется.

К глубокому сожалению, бездумные преобразования за последние 15–20 лет привели к катастрофическому падению уровня знаний по точным наукам в школе, затем и в профессиональном образовании. Введенные новые стандарты профессионального образования дали относительную «свободу» и в принципе позволяют оптимизировать учебные планы в соответствии с видением специалистов учебного заведения. Но ... свелось это все практически к изгнанию фундаментальной составляющей в инженерном образовании в пользу специальных дисциплин.

Создание Дальневосточного федерального университета (ДВФУ) безусловно крайне важно для развития образования и науки в Дальневосточном регионе. Однако общая ситуация в стране: падение промышленного производства, недальновидная политика местных органов самоуправления, нашествие «варягов» из Москвы привели к кризисной ситуации с инженерным образованием в университете. Несколько десятилетий ранее самостоятельные крупнейшие вузы Владивостока: классический университет и политехнический институт оспаривали свое старшинство. Введение их в состав ДВФУ разрешило этот спор в пользу классического университета и началось практически уничтожение инженерного образования.

Нами проведен анализ 29-ти учебных планов бакалавриата и 6-ти учебных планов специалитета. В процессе анализа сложилось впечатление, что создание стандартов вуза и учебных планов в большинстве случаев в инженерной школе было выполнено не вполне компетентными в этих вопросах специалистами. Выявлены следующие моменты:

1. Только в 6-ти учебных планах более-менее прослеживается понимание необходимости фундаментализации инженерного образования.

2. Фундаментальные общепрофессиональные дисциплины ведутся на разных выпускающих кафедрах, что не позволяет реализовать принципы единства научного, методического и технологического подхода к организации учебного процесса в

современных комбинированных технологиях, а главное принципа преемственности. Безусловное согласование УМКД каждой дисциплины с выпускающей кафедрой позволяет учесть преемственность содержания и принципов обучения общепрофессиональных и специальных дисциплин, но выполняется эта процедура формально.

3. Вызывает недоумение, что к классическим названиям дисциплин добавлены «уточнения». Например, «Инженерная графика в горном деле, в машиностроении, в мехатронике и робототехнике, в транспортном комплексе», есть «Инженерная графика и основы автоматизированного проектирования»??? Есть курсы: «Теория судовых механизмов и машин», «Детали судовых механизмов и машин» и, как правило, эти курсы читаются на разных выпускающих кафедрах часто не специалистами в этих областях знаний. Конечно, есть отдельные особенности при изучении классических дисциплин на разных специальностях, но, во-первых, это должно быть учтено в рабочих программах, которые обязательно должны согласовываться с руководителями учебных программ, во-вторых, есть большое количество специальных дисциплин, где эти особенности можно раскрыть на базе знаний по классическим курсам.

4. Обращает на себя внимание разнообразие в названии дисциплины «Механика». Помимо дисциплины «Теоретическая механика» есть: просто «Механика», «Прикладная механика», «Техническая механика», «Основы механики и конструирования», «Теоретическая и прикладная механика». На некоторых специальностях есть и «Теоретическая механика» и **еще другая**, но ... отсутствует дисциплина «Сопротивление материалов».

5. Вызывает удивление распределение кредитов между дисциплинами. Оно явно не в пользу общепрофессиональных дисциплин, на которые отводится в основном по 3 зачетных единиц (ЗЕД).

6. В некоторых стандартах указывается перечень рекомендуемых дисциплин, обеспечивающих формируемые компетенции специалиста. На многих специальностях в этом перечне только одна – две дисциплины: «Начертательная геометрия», «Теоретическая механика», или просто «Механика». В стандарте также прописано, что должны *знать*, *уметь* и чем *владеть* будущие специалисты. Однако эти дисциплины не соответствуют в полной мере содержанию: *уметь*, *знать*, *владеть* и не могут обеспечить формирование требуемых компетенций. Например, в учебном плане по специальности 20.03.01 «Техносферная безопасность» обозначены две дисциплины: «Начертательная геометрия» и «Механика» (по 3 ЗЕД), а согласно федеральному стандарту выпускники должны *знать*:

- методы и средства компьютерной графики;
- основы проектирования технических объектов;
- основные виды механизмов;
- методы исследования и расчета их кинематических и динамических характеристик;
- методы расчета на прочность и жесткость типовых элементов различных конструкций;

уметь:

- применять действующие стандарты, положения и инструкции по оформлению технической документации;
- использовать современные средства машинной графики;
- применять методы анализа и синтеза исполнительных механизмов;
- применять методы расчета и конструирования деталей и узлов механизмов;
- проводить расчеты деталей машин по критериям работоспособности и надежности;

владеть:

- навыками разработки и оформления эскизов деталей машин, изображения сборочных единиц, сборочного чертежа изделия, составлять спецификацию с использованием методов машинной графики;
- навыками изображения пространственных объектов на плоских чертежах;
- навыками использования методов теоретической механики, теории механизмов и машин, сопротивления материалов, деталей машин и основ конструирования при решении практических задач.

Разве реально все это реализовать за 36 лекционных часов, 18 часов лабораторных работ и 54 часа практических занятий без учебного (курсового) проектирования? Похожая ситуация и по другим специальностям.

7. Вызывает также удивление распределение часов на лекции, практикумы и самостоятельную работу. Единообразие прослеживается только в дисциплине «Начертательная геометрия»: 18 лекционных и 36 практических занятий. В дисциплине «Инженерная графика» лекционные часы варьируются от 0 до 36, и только в одном учебном плане имеются лабораторные работы. В дисциплине «Теоретическая механика» ни в одном учебном плане нет лабораторного практикума, и только в дисциплине «Механика» в некоторых планах отводится на лабораторные работы по 18 часов. По курсу «Теория механизмов и машин» из пяти специальностей предусмотрен лабораторный практикум только в двух. Только на одной специальности 26.03.02 «Кораблестроение» лабораторных занятий 54 часа. Столько же часов выделено по курсу «Детали машин». Правда, к классическим названиям добавлено слово «судовых» и эти дисциплины закреплены за выпускающей кафедрой. Оборудование для проведения лабораторных работ имеется, хотя и требует обновления. Отсутствие учебного проектирования в дисциплинах «Теория механизмов и машин» и «Детали машин» следует считать диверсией, уничтожением основ инженерного образования. Выработать необходимые навыки без проектирования невозможно!

Сложившаяся ситуация активно обсуждалась и на круглом столе в рамках Международной научной конференции «Развитие политехнического образования» в сентябре 2016 г. в г. Владивостоке, на которой были представлены доклады ведущих ученых из 8 крупнейших вузов страны из городов: Санкт-Петербурга, Тулы, Пензы, Иркутска, Архангельска, Владивостока. Были внесены предложения по стабилизации инженерного образования:

- Нецелесообразно часто менять учебные стандарты. Периодичность изменения должна быть не менее чем через 5 лет.
- Необходимо вернуть во все стандарты и учебные планы по инженерному направлению дисциплину «Теория механизмов и машин», как основополагающую фундаментальную составную часть инженерного образования. Вернуть в этот курс курсовое проектирование.
- В учебных стандартах по инженерному направлению необходимо прописать и строго контролировать логическую последовательность изучения фундаментальных дисциплин: «Сопротивление материалов», «Теоретическая механика», «Материаловедение», «Теория механизмов и машин», «Детали машин и основы конструирования».
- Необходимо навести порядок в учебных планах вузов в вопросах, касающихся преемственности и последовательности распределения естественнонаучных, общеинженерных и специальных дисциплин по семестрам, исключив параллельное, а иногда и «запоздалое» изучение взаимосвязанных предметов; реализовать системный подход (преемственность) между естественнонаучными, профессиональными

и специальными дисциплинами на основе информационных сред специальности.

- Учитывая развитие новых технологий в образовании на базе электронных средств организации обучения и внедрения дистанционных форм обучения, изменить пропорции между часами лекционных, практических, лабораторных и самостоятельных занятий (в сторону уменьшения лекционных и самостоятельных, но увеличения лабораторных и практических занятий). Сделать часы самостоятельной работы мотивированными для студентов и для преподавателей. Учитывать эти часы в нагрузке преподавателя.
- Целесообразно с целью обеспечения высокого уровня преподавания естественнонаучных и инженерных дисциплин организовать разработку показательных (типовых) презентаций по этим дисциплинам.
- Учитывая, что последние два года в 10-ом и 11-ом классах средней школы практически не учат ничему новому, а тупо натаскивают на ЕГЭ, предлагается начинать готовить специалистов по схеме: школа (1–9 класс), следующий этап – техникум (лицей), потом вуз (4 года – бакалавриат, 2 года – магистратура или специалитет, возможно и аспирантура). Школьную программу необходимо осваивать в школе!!!
- Для повышения качества инженерного образования необходимо увеличить количество часов по математике и физике на первом курсе, хотя бы в часах, бывших у специалитета.
- При расчете нагрузки преподавателей учитывать колоссальную потерю ими времени на проверку заданий в автоматических системах учета и контроля (типа Moodle, Blackboard и др.).
- По существующему на сегодняшний день законодательству выезд в командировку за счет средств другой фирмы (даже если он оформлен по 217 ФЗ) приравнивается к прогулу. Предлагается внести в законодательство РФ положение, что преподаватели имеют право выезжать в командировки за счет других фирм в свободное от занятий время.
- Необходимо восстановить ранее существующие общепрофессиональные инженерные кафедры (возможно изменив их структуру), но отделив их от выпускающих, т.к. исчезает методика преподавания этих дисциплин, утрачены лабораторные базы, уменьшается профессионализм преподавателей, ведущих эти дисциплины.
- Уровень подготовки самих учителей (особенно точных наук) в школах в последние годы сильно упал. Предлагается ввести в школах неформальную аттестацию учителей (возможно с участием представителей вузов).
- В связи с уменьшением времени обучения бакалавров, по сравнению со специалистами, и необходимостью обеспечения инженерного уровня их подготовки организовать разработку и внедрение в учебный процесс современных автоматизированных систем курсового проектирования и технологий обучения инженерным дисциплинам. Выполнять в курсовом проектировании многовариантные исследовательские расчеты с использованием профессиональных пакетов.

- Лабораторное оборудование специализированных лабораторий по общепрофессиональным дисциплинам: «Начертательная геометрия и инженерная графика», «Сопротивление материалов», «Теоретическая механика», «Материаловедение», «Теория механизмов и машин», «Детали машин и основы конструирования» и физически и морально устарело, необходимо его обновление. Недопустимо использование только виртуальных лабораторий.
- Для повышения эффективности обучения и ответственности преподавателей за его результаты целесообразно проводить на кафедрах общепрофессиональных дисциплин систему входного контроля остаточных знаний, полученных при изучении дисциплин математического и естественнонаучного цикла, а на выпускающих кафедрах – систему контроля остаточных знаний, полученных при изучении общепрофессиональных дисциплин. Результаты опроса доводить до преподавателей соответствующих кафедр.
- При формировании планов подготовки магистров разделять программы для студентов, проходивших обучение в бакалавриате по тем же направлениям или специальностям, и другими студентами, не имеющими такой подготовки.
- Для студентов с низким баллом ЕГЭ с учетом входного контроля остаточных знаний школьного курса необходимо организовать проведение дополнительных занятий по математике и физике.
- В инженерном образовании необходимо соблюдать разумное сочетание традиционных и дистанционных технологий обучения.
- Рекомендовать ведущим преподавателям обязательно работать в малых ООО, выполняющих инновационные проекты, на руководящих научных должностях. Это позволит поддержать их финансово и лучше понимать требования современного производства.
- Разрешить набор студентов по договору можно в неограниченных количествах, но не выкручивать руки преподавателям по вопросам сохранения контингента: обучать способных и старательных, заинтересованных в получении образования и его применении.
- С целью повышения квалификации преподавателей общепрофессиональных инженерных дисциплин организовать (восстановить) на базе ведущих кафедр России систему повышения квалификации по содержанию дисциплин и современным технологиям их преподавания.

По результатам анализа учебных планов с учетом предложений участников конференции была подготовлена служебная записка с предложениями конкретных мер по устранению отмеченных недостатков и передана руководству Инженерной школы и ДВФУ. Однако никаких конструктивных действий не было предпринято.

Более того, закрыли набор и в бакалавриат и в магистратуру по инженерному направлению 15.03.03 «Математика и компьютерное моделирование механических систем и процессов» (кафедра «Механика и математическое моделирование»). Тогда как подготовка специалистов по этому направлению наиболее всего соответствует задачам развития экономики и промышленности на новой прорывной технологической основе, **поставленным на ближайшие годы**. Закрытие набора на эту специальность однозначно означает ошибку, или еще хуже – диверсию. На кафедре работают высококвалифицированные преподаватели, способные реализовать учебные планы по этому направлению не только для российских студентов, но и для зарубежных. В России очень немногие вузы (не более 3) готовят специалистов по этому направлению.

Материалы по этому вопросу были направлены президенту и в правительство РФ, в краевые и городские органы управления, думы всех уровней, руководству ДВФУ и ИШ. Чиновничья Бюрократическая отписка пришла только через месяц от заместителя директора департамента координации деятельности учреждений высшего образования Миннауки РФ Пономаревой Н. И. Ответ подтвердил, что ведется целенаправленная политика по уничтожению инженерного образования. И совсем свежий факт. 1.11.2018 г. в ДВФУ прошло мероприятие в связи со столетним юбилеем инженерного образованием на Дальнем Востоке. Его можно назвать «поминками по инженерному образованию», так как накануне пришло сообщение о закрытии набора еще по 6 инженерным направлениям! И это для Дальневосточного региона, который вроде бы планируется развивать!!!

Но... ДВФУ «пыжится» поднять свой рейтинг среди крупнейших мировых вузов! Меняются руководители, партнеры, системы. Начатые ранее работы по созданию оригинальных онлайн курсов с «Универсариумом» остановлены, теперь покупаем готовые курсы у «Лекториума», хотя по инженерным дисциплинам у них, практически ничего нет.

Много, очень много говорится о цифровой экономике и единой цифровой образовательной среде на Дальнем Востоке. Открыт (создан) новый институт «Цифровая экономика», хотя уже есть институт «Экономика и менеджмент» Выигран солидный грант для развития онлайн обучения. С чего начали? Создали очередной департамент под эгидой проректора по учебной работе, организовали конференцию, пригласив спикеров в основном из Москвы (полученный грант надо же отрабатывать)! Прошло уже полгода и стало понятно, что организаторы не знают, как озвученные планы реализовывать.

Замена системы управления учебным процессом накануне начала учебного года привела к коллапсу! До сих пор расписание занятий «уточняется»! Имеют место срывы занятий. За многолетнюю практику – это впервые!

Сложившаяся ситуация с инженерным образованием недопустима и требуется немедленная корректировка! Необходимо одуматься и восстановить набор бакалавров и магистров на инженерные направления, особенно «Механика и математическое моделирование», «Конструкторское обеспечение машиностроения» с использованием современных цифровых средств и технологий обучения. Специалисты такого профиля крайне нужны для развития экономики в целом и особенно Дальневосточного региона.

Для развития и поддержки современных цифровых технологий в инженерном образовании необходимо наличие научной лаборатории «Механика машин и САПР».

С целью повышения качества инженерного образования организовать кафедру общепрофессиональных инженерных дисциплин.

Принять меры к исправлению уродливой второй ступени высшего образования. Для первой ступени высшего образования – бакалавриата необходимо усилить фундаментальную составляющую: естественнонаучную и общепрофессиональную. Вторая ступень должна быть разная: магистратура – для желающих заниматься наукой и преподавательской деятельностью; специалитет по инженерным направлениям – для желающих идти на производство.

Инженерное образование в ДВФУ при правильной политике и организации способно стать приоритетным и привлекательным не только для России, но и для зарубежных стран.

***

1. Федоров И.В., Ипполитова Г.К., Минина О.Г., Лезина О.В. Инженерное образование в современном мире // Аккредитация в образовании: электронный научный журнал. – 2009. – № 4 [Электронный ресурс]. URL: http://www.akvobr.ru / inzhenernoe_obrazovanie_v_sovremennom_mire. (дата обращения: 25.10.2018).

2. Семенова А.В. Инженерное образование в России: история и проблемы его развития // Социология и общество: социальное неравенство и социальная справедливость (Екатеринбург, 19-21 октября 2016 года) [Электронный ресурс] Материалы V Всероссийского социологического конгресса /отв. ред. В.А. Мансуров — Электронные данные — М.: Российское общество социологов, 2016. С. 9336-9354. [Электронный ресурс]. URL:<http://www.isras.ru/publ.html?id=4710&printmode> (дата обращения: 25.10.2018).
3. Кулешов А. Мы снова оказались в 1929 году...// Знак: интернет-газета. – 2016. – [Электронный ресурс]. URL: https://www.znak.com/2016-06-28/glava_skolteha_otkrovenno_rasskazal_o_katastrofe_v_rossiyskom_inzhe-nernom_obrazovanii. (дата обращения: 25.10.2018).
4. Послание президента Федеральному собранию в 2014 году [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/society/20141204/1036563539.html>. (дата обращения: 25.10.2018).

Майрансаев З.Р., Чернышев А.Б.

Использование функции Грина в импульсных системах управления

ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

(Россия, Владикавказ)

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», институт сервиса, туризма и дизайна (филиал)

(Россия, Пятигорск)

doi: 10.18411/lj-12-2018-179

idsp: ljjournal-12-2018-179

Аннотация

В работе рассмотрен процесс формирования импульса в результате мгновенного точечного воздействия. Воздействие представлено в виде функции Грина для отрезка, представленной в виде разложения в ряд Фурье по собственным функциям. Показан процесс изменения формы импульса с течением времени.

Ключевые слова: функция Грина, импульсные системы, распределенные системы, точечный источник, ряд Фурье.

Во многих технических устройствах применяется метод импульсного управления. Этот метод позволяет экономить энергоресурсы. Также применение импульсного управления требуют некоторые технологические процессы [1,2]. Рассмотрим применение этого метода для систем с распределенными параметрами. Системы с распределенными параметрами – это системы математическая модель, которых описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Использование таких математических моделей связано с необходимостью учитывать в процессе управления не только временной параметр, но и пространственные координаты объекта [3,4].

Пусть объект с распределенными параметрами имеет только одну пространственную координату, предположим это тонкий однородный стержень. Рассмотрим процесс распространения тепла в стержне. Предполагаем, что боковая поверхность стержня теплоизолированная и на его концах поддерживается условно нулевая температура. В начальный момент времени температура внутри стержня также равна нулю во всех его точках. Пусть в некоторый момент времени τ в некоторой точке ξ на стержень оказывается мгновенное импульсное воздействие [5]. Значение температуры в любой точке x в любой момент времени t , вызванной действием мгновенного точечного источника, действующего в момент τ в точке ξ , определяется с помощью функции Грина, представляющей собой бесконечный ряд Фурье [6,7]:

$$G(x, t, \xi, \tau) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x \sin \frac{\pi n}{l} \xi. \quad (1)$$

В начале процесса при $t=0$ и $\tau=0$:

$$\exp\left[-\left(\frac{\pi na}{l}\right)^2 (t - \tau)\right] = 1;$$

Формула (1) примет вид:

$$T(x, \xi) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x \sin \frac{\pi n}{l} \xi;$$

Предположим, что импульсный источник оказывает воздействие в точке

$$\xi = \frac{l}{4},$$

где l – длина стержня.

Тогда:

$$T(x, \xi) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{4} \sin \frac{\pi n}{l} x;$$

Для первых шести гармоник ряда Фурье, получим:

$$T_1(x) = \frac{2}{l} \sin \frac{\pi}{4} \sin \frac{\pi}{l} x = \frac{\sqrt{2}}{l} \sin \frac{\pi}{l} x; \quad A_1 = \frac{\sqrt{2}}{l}; \quad T_1\left(\frac{l}{4}\right) = \frac{1}{l};$$

$$T_2(x) = \frac{2}{l} \sin \frac{\pi}{2} \sin \frac{2\pi}{l} x = \frac{2}{l} \sin \frac{2\pi}{l} x; \quad A_2 = \frac{2}{l}; \quad T_2\left(\frac{l}{4}\right) = \frac{2}{l};$$

$$T_3(x) = \frac{2}{l} \sin \frac{3\pi}{4} \sin \frac{3\pi}{l} x = \frac{\sqrt{2}}{l} \sin \frac{3\pi}{l} x; \quad A_3 = \frac{\sqrt{2}}{l}; \quad T_3\left(\frac{l}{4}\right) = \frac{1}{l};$$

$$T_4(x) = \frac{2}{l} \sin \pi \sin \frac{4\pi}{l} x = 0; \quad A_4 = 0; \quad T_4\left(\frac{l}{4}\right) = 0;$$

$$T_5(x) = \frac{2}{l} \sin \frac{5\pi}{4} \sin \frac{5\pi}{l} x = -\frac{\sqrt{2}}{l} \sin \frac{5\pi}{l} x; \quad A_5 = \frac{\sqrt{2}}{l}; \quad T_5\left(\frac{l}{4}\right) = \frac{1}{l};$$

$$T_6(x) = \frac{2}{l} \sin \frac{3\pi}{2} \sin \frac{6\pi}{l} x = -\frac{2}{l} \sin \frac{6\pi}{l} x; \quad A_6 = \frac{2}{l}; \quad T_6\left(\frac{l}{4}\right) = \frac{2}{l};$$

$$A_n = \left| \frac{2}{l} \sin \frac{\pi n}{4} \xi \exp\left[-\left(\frac{\pi na}{l}\right)^2 t\right] \right|.$$

A_n – амплитуда сигнала n -й гармоники ряда.

В результате совместного воздействия бесконечного числа гармоник ряда в начальный момент времени в точке приложения воздействия будет формироваться сигнал, показанный на рисунке 1.

Рис. 1. Процесс формирования сигнала (при $n=6$ и при $n \rightarrow \infty$)

Таким образом, полагая, что на вход рассматриваемого объекта поступило единичное импульсное возмущение, приложенное в точке ξ_0 в момент времени τ_0 , на выходе получим:

$$T(x, t) = \int_0^t \int_0^l G(x, t, \xi, \tau) \delta(\xi - \xi_0) \delta(\tau - \tau_0) d\xi d\tau = G(x, t, \xi_0, \tau_0).$$

Зависимость распределения температуры в стержне от времени, в результате действия источника в точке $\xi=l/4$, можно представить в виде графика (рис. 2). ($t_1 < t_2 < \dots < t_5$). Импульс, вызванный воздействием мгновенного точечного источника, с течением времени убывает и принимает симметричное положение относительно середины отрезка.

Рис. 2. Пространственно-временная зависимость распределения температуры

Если точечных источников несколько, то очевидно, что импульсы, создаваемые ими, будут оказывать взаимное воздействие друг на друга. Необходимо также учитывать, что в процессе формирования температурного поля, включение источников подразумевается в различные моменты времени.

***

1. Дровосекова Т.И., Рудакова Т.А., Цаплева В.В. Моделирование обогрева тепличных помещений с использованием геотермальных вод // Современная наука и инновации. – 2018. – № 1(21). – С. 8-14.

2. Ляшенко А.Л. Решение задач моделирования. – Пятигорск: ПГТУ, 2005. – 103 с.
3. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
4. Martirosyan A.A., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Methods of distributed system's structured modelling//В сборнике: Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIconRusNW 2016. С. 283-289.
5. Чернышев А.Б., Козлов В.А., Багдамян В.Е. Оценка интервалов времени включения управляющих воздействий в процессе стабилизации температурного поля //Научное обозрение. – 2013. – № 5. – С. 98-104.
6. Chernyshev A.B., Martirosyan K.V., Martirosyan A.V. Analysis of the nonlinear distributed control system's sustainability // Journal of Mathematics and Statistics. –2014. –Т. 10. № 3. – С. 316-321.
7. Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Ильющин Ю.В. Моделирование релейно-импульсных распределенных систем – Пятигорск: изд-во ПГТУ, 2012. – 248 с.

Костенкова Ю.В., Нестеров Ю.Г.

**Сравнительный анализ протоколов когерентности кэш-памяти
мультипроцессорных систем**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-180

idsp: ljjournal-12-2018-180

Аннотация

Статья посвящена исследованию основных характеристик протоколов обеспечения согласованной работы кэш-памяти в многопроцессорных системах. В статье сформулирована проблема обеспечения согласованности кэш-памяти многопроцессорных систем, заключающаяся в исключении ситуации одновременной обработки процессорами одних и тех же данных. Обозначены базовые пути решения этой проблемы, основанные на трех подходах – сквозной записи, справочника и наблюдения, рассмотрены протоколы обеспечения совместимости, на основе каждого из трех указанных подходов, выявлены преимущества, недостатки и области применимости каждого протокола. Проведён сравнительный анализ эффективности работы кэш-памяти по двум базовым алгоритмам (справочника и наблюдения).

Ключевые слова: кэш-память, протокол, когерентность, мультипроцессорная система, контроллер, процессор, модель

Обеспечение когерентности (согласованности) кэш-памяти мультипроцессорных систем необходимо, так как в противном случае нарушается распределение программных ресурсов между процессорами. Иначе говоря, два и более процессора могут начать изменять одни и те же данные или выполнять одни и те же инструкции. Интуитивно понятно, что лучшая характеристика для такой ситуации – «низкая эффективность», однако зачастую это приводит к сбою системы. Поэтому вопрос обеспечения согласованности в мультипроцессорных системах крайне актуален. В этом случае либо приходится сокращать число процессорных ядер до двух-трех, либо использовать специальные протоколы обеспечения согласованности. Упрощенная структурная схема мультипроцессорной системы для организации параллельных вычислений представлена на рисунке 1.

Суть упрощения в том, что на структуре не показаны периферийные устройства ввода-вывода, долговременные накопители информации и т.д.

Процессоры PU1..PUN (сокращение от Processor Unit), модули кэш-памяти и контроллер кэш-памяти взаимодействуют с ОЗУ через коммуникационную шину CB1 (сокращение от Communication Bus). Отметим, что данная шина включает в себя параллельные шины адреса (для адресации данных), данных и управления (сигналы синхронизации и некоторые другие). Каждый процессор имеет кэш-память C1..CN.

Взаимодействие конкретной кэш-памяти с ОЗУ и с процессором в каждый момент времени обеспечивает кэш-контроллер.

Рисунок 1 – Упрощенная структурная схема мультимикропроцессорной системы

У показанной на рисунке 1 системы возможны следующие степени свободы:

1. чтение-запись для каждой из N пар кэш-процессор;
2. чтение-запись между кэш и ОЗУ;
3. чтение-запись для любого из N процессоров в ОЗУ.

Контроллер кэш-памяти реализует один из возможных протоколов согласования кэшей (который представляет собой согласованное выполнение указанных 6-ти операций, причем все процессоры могут выполнять операции доступа к разным ячейкам памяти одновременно), в результате чего одновременная обработка одних и тех же данных разными процессорами исключается.

Далее, для дальнейшего рассмотрения задачи согласования кэш-памяти в мультимикропроцессорной системе, введем ряд определений. Под протоколом согласования будем понимать набор правил, которым следуют кэш, процессор и основная память, чтобы предотвратить появление разной версии строки кэша в нескольких процессорах. Под строкой кэша следует понимать минимальную единицу хранения и передачи данных в системе ОЗУ-кэш-процессор, которая обычно представляет собой пакет длиной 32 или 64 байта.

Для краткости система кэш-памяти и кэш-контроллера в мультимикропроцессорных системах именуется следящим кэшем (snooping cash), так как любой протокол согласования кэш-памяти действительно основан на отслеживании обмена данными между различными процессорами, кэш-памятями и ОЗУ.

Для понимания механизма действия различных протоколов обеспечения когерентности кэш-памяти в мультимикропроцессорной системе целесообразно начать с WT-протокола или протокола сквозной записи (от английской аббревиатуры Write Through). Ситуации, которые возможны при использовании данного протокола, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Состояния следящего Кэша, работающего по WT-протоколу

Ситуация	Действие при локальном запросе	Действие при удаленном запросе
Кэш-промах чтения	Вызов данных из ОЗУ	Нет действия
Кэш-попадание чтения	Передача данных из Кэша в	Нет действия

	процессор	
Кэш-промах записи	Обновление данных в ОЗУ	Нет действия
Кэш-попадание записи	Обновление Кэша и ОЗУ	Объявление элемента в Кэше недействительным

Если записать строку в кэш не удалось (ситуация кэш-промаха записи), то модифицированная строка будет записана в ОЗУ, минуя кэш-память. Если операция записи строки прошла удачно (ситуация кэш-попадания), то выполняется обновление кэша, но при этом строка также пишется и в ОЗУ. Так гарантируется актуальность хранимой в ОЗУ информации, но при этом очевидно, что данный алгоритм относится к «жадным».

Далее рассмотрим поведение WT-протокола при удаленном запросе. Пусть кэш C1 (см. рисунок 1) выполняет действия по запросу к удаленному кэшу C2. В случае кэш-промаха чтения C1 кэш C1 обращается к ОЗУ, чтобы получить строку из неё. При этом кэш C2 бездействует (согласно таблице 1), также никаких действий не происходит с кэшем C2 и при кэш-попадании чтения, и при кэш-промахе записи. При кэш-попадании записи кэш C2 проверяет не является ли записываемая кэшем C1 строка идентичной строке, хранимой в кэше C2. Если не является, то это ситуация кэш-промаха, при которой с кэшем C2 ничего не происходит (система продолжает работать нормально). Если же это слово имеется в кэше C2, то данная ситуация (кэш-промах записи) может привести к нарушению когерентности (согласованности) кэш-памяти и сбою системы. Поэтому кэш C2 отмечает данную строку как недействительную (см. таблицу 1) и в процессор PU2 она не пойдет. Таким образом, достигается обеспечение когерентности (согласованности) кэш-памяти при WT-протоколе.

Между тем, данная ситуация является не единственной ситуацией, при которой согласованная работа процессоров может нарушиться. Существует большая вероятность, что процессор PU2, либо любой другой, прочитает слово, отмеченное кэшем как недействительное непосредственно из ОЗУ (на следующем цикле). В этом случае контроллер кэша обновляет содержимое кэш-памяти, что занимает несколько больше времени и, в конечном счете, приводит к необходимости хранения и обработки больших объемов данных. Потому, для обеспечения оптимального быстродействия важно выбрать правильную стратегию обеспечения согласования кэша. В случае если вероятность повторного считывания мала, то при кэш-промахе данные объявляют недействительными, а иначе выполняют обновление.

Недостатком рассмотренного WT-протокола является необходимость значительного числа операций передачи данных в ОЗУ по шине данных. В результате этого быстродействие системы резко снижается (по сравнению с другими протоколами) и может быть повышено только за счет повышения пропускной способности коммуникационной шины. По этой причине широкого практического распространения WT-протокол обеспечения когерентности кэш-памяти в мультипроцессорных системах не получил. Были разработаны другие протоколы, в которых не каждая операция записи ведет к записи непосредственно в ОЗУ.

Точно также как и многие из простых решений, данное решение не является сильно эффективным. Так как каждая операция записи требует передачи информации в основную память по шине, и при многочисленных процессорах шина становится мало вместительной. По этой причине создали иные протоколы. Но все они имеют Все они имеют одну общую характеристику: не каждая операция записи ведет к записи напрямую в основную память. Напротив, при внесении изменений в строку кэша внутри кэша устанавливается специальный бит, который свидетельствует о том, что строка в кэше верна, а в памяти — нет. Но рано или поздно эту строку будет нужно записать в память, скорее всего, что это произойдет после осуществления еще нескольких операций записи. Данный тип протокола еще называют протоколом отложенной записи.

Рассматривать протоколы такого типа целесообразно при рассмотрении протоколов на основе справочника (directory based), а также на основе наблюдения (snooping based).

Протокол обеспечения когерентности на основе справочника применяется для мультипроцессорных систем со сложной топологией (для которой как правило свойственно, что процессоры объединяются многоступенчатой иерархической сетью межсоединений). В такой ситуации широковещательные протоколы наблюдения являются весьма дорогостоящими и приносят низкую эффективность.

Смысл протоколов на основе справочника заключается в применении области памяти, в которой хранится информация о содержимом всех локальных кэш-справочника. Данный вид протокола осуществляется контроллером кэш-памяти, который, чаще всего, физически является элементом контроллера ОЗУ.

Схема организации протокола на основе справочника представлена на рисунке 2.

Рисунок 2 – Схема организации протокола на основе справочника

При использовании таких протоколов данные о содержимом всех локальных кэш-памяти собираются в особой области ОЗУ, именуемой областью справочника. Далее контроллер кэша выполняет их отслеживание тем или иным образом (существует несколько основных модификаций протокола на созданных основе справочника). Информация из справочника передается в кэш-память при выполнении запроса контроллера кэш-памяти.

Когда контроллер локальной кэш-памяти осуществляет соответствующий запрос, контроллер справочника определяет, что поступил такого рода запрос и создает команды, которые нужны для пересылки данных из основной памяти или же из иной локальной кэш-памяти, содержащей последнюю актуальную версию тех данных которые запрашиваются. Центральный контроллер ответственен за выполнение обновления информации о состоянии локальных кэш-памяти. Этот контроллер должен быть своевременно извещен о каком-либо локальном действии, которое влияет на состояние блока данных. В таком справочнике содержится большое количество записей, каждая из них описывает каждую кэшируемую ячейку ОЗУ, которая может быть совместно применена вместе с другими процессорами системы. Обращение к справочнику выполняется каждый раз, когда один из процессоров вносит изменения в копию такой ячейки в своей локальной памяти. В этом случае информация из справочника нужна для того, чтобы аннулировать или обновить копии измененной ячейки в прочих локальных кэшах, где имеются такие копии. Для каждой строки общего пользования, копия которой может быть помещена в кэш-память, в справочнике выделяется одна запись, хранящая указатели на копии данной строки. Кроме того, в каждой записи выделен один бит модификации (D), показывающий,

является ли копия «грязной» ($D=1$ – dirty) или «чистой» ($D=0$ – clean), то есть изменялось ли содержимое строки в кэш-памяти после того, как она была туда загружена. Этот бит указывает, имеет ли право процессор производить запись в данную строку.

Для системы с несложной топологией (2, 4 и т.д. процессоров) целесообразно применение протокола на основе наблюдения или протокола MESI. Данный протокол реализуется с помощью микропрограммного автомата, имеющего 4 состояния (по первым буквам этих состояний он и получил свое название):

- измененное состояние (Modified): информация, хранимая в кэш-памяти микропроцессора А, достоверна только в этом кэше; она отсутствует в оперативной памяти и в кэш-памяти других микропроцессоров;
- исключительная копия (Exclusive): информация, содержащаяся в кэше А, содержится еще только в оперативной памяти;
- разделяемая информация (Shared): информация, содержащаяся в кэше А, содержится в кэш-памяти по крайней мере еще одного МП, а также в оперативной памяти;
- недостоверная информация (Invalid): в строке кэш-памяти находится недостоверная информация.

Возможные состояния сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Состояния контроллера при протоколе MESI

Состояние признака протокола	Состояние строки памяти		
	Кэш А	Кэш В	ОЗУ
Modified	Д	НД	НД
Shared	Д	Д	Д
Exclusive	Д	НД	Д
Invalid	НД	Х	Х

При работе микропроцессора А с точки зрения обеспечения когерентности памяти возможны следующие ситуации:

- RH (Read Hit) - кэш-попадание при чтении;
- WH (Write Hit) - кэш-попадание при записи;
- RME (Read Miss Exclusive) - кэш-промах при чтении;
- RMS (Read Miss Shared) - кэш-промах при чтении, но соответствующий блок есть в кэш-памяти другого микропроцессора;
- WM (Write Miss) - кэш-промах при записи;
- SHR (Snoop Hit Read) - обнаружение копии блока при прослушивании операции чтения другого кэша;
- SHW (Snoop Hit Write) - обнаружение копии блока при прослушивании операции записи другого кэша.

Повышенный интерес здесь представляют две последних критерия. Современные микропроцессоры оснащены двунаправленной шиной адреса. Выдавая какие-либо данные на эту шину, микропроцессор адресует ячейки оперативной памяти или устройства ввода-вывода. По причине того, что в рассматриваемой сейчас мультипроцессорной системе микропроцессоры объединены общей шиной, а также шиной адреса, принимая информацию по адресным линиям, микропроцессор определяет, было ли обращение по адресам, которые находятся в его кэш-памяти, со стороны иных микропроцессоров. Когда обнаружено такого рода обращение, то изменяется состояние строки кэш-памяти микропроцессора.

Перемены признака состояния блока кэш-памяти МП в зависимости от разнообразных ситуаций в его работе или же работе мультимикропроцессорной системы наглядно изображены на рисунке 3.

Рисунок 3 – Организации протокола на основе наблюдения (MESI-протокол)

Покажем наглядно определенные из представленных переходов. Пусть блок кэш-памяти находится в состоянии Modified, таким образом достоверная информация расположена лишь в кэш-памяти данного МП. В такой ситуации при нахождении при прослушивании адресной шины обращения со стороны другого микропроцессора для осуществления чтения информации по входящим в эту строку адресам микропроцессор передает эту строку кэш-памяти в ОЗУ, откуда ее прочтет другой микропроцессор. В такой ситуации состояние строки в кэш-памяти рассматриваемого микропроцессора изменится с модифицированного на разделяемое (Shared). Если строка кэш-памяти была в состоянии Invalid, информация в ней не была правильной. То есть относительно этой строки нужно рассматривать лишь ситуации, связанные с кэш-промахами. Если, например, по каким-то определенным причинам произошел кэш-промах при осуществлении операции записи, то соответствующая необходимая строка будет занесена в кэш-память этого МП, в эту строку будут записаны переменные данные, и она получит статус исключительного владельца обновлённой информации (Modified).

Заключение

Стремительное развитие вычислительной техники, повышение требований к обрабатываемой информации, проникновение вычислительной техники в различные области человеческой деятельности (например, создание систем электронного документооборота) привело к тому, что многопроцессорная архитектура вычислительных систем стала применяться не только при построении суперкомпьютеров, но и при реализации небольших серверов данных и даже отдельных персональных ЭВМ. По существу вычислительные системы под процессор, содержащий 2, 4 8 и более ядер являются современным стандартом персональных ЭВМ и серверов обработки данных. Разумеется, и число процессорных ядер суперЭВМ также возрастает, достигая количества 512, 1024 и более. Пропорционально возрастанию числа ядер, возрастает и объем ОЗУ, усложняются топологии вычислительных систем.

Указанные обстоятельства приводят к необходимости разработки и совершенствованию мер, обеспечивающих согласованную работу процессоров в мультипроцессорной системе. Несогласованная работа процессоров приводит к тому, что процессоры обращаются к одним и тем же ячейкам ОЗУ или кэш-памяти, что в конечном счете приводит к некорректной работе программы.

Именно алгоритмам (которые принято называть протоколами) обеспечения согласованной работы (когерентности) кэш-памяти с целью выбора оптимальных для конкретной системы и посвящено данное исследование. В ходе работы было рассмотрено три базовых алгоритма (три класса алгоритмов), среди которых «жадный» и наиболее простой (со сквозной записью или WT-алгоритм), ориентируемый для систем со сложной топологией и большим количеством процессорных ядер (на основе справочника) и

оптимизированный для небольших систем (на основе наблюдения или MESI-алгоритм). Выяснилось, что алгоритмы со сквозной записью наиболее устойчивы, но в то же время быстроедействие системы может существенно замедляться, так как при каждом цикле чтения/записи происходит обращение к ОЗУ. Алгоритм на основе справочника оптимизирован по быстрдействию, но не оптимален для больших систем. Наконец, MESI-алгоритм оптимально подходит к системам, содержащим 2,4,8 ядер.

В ходе работы была рассмотрена многопараметрическая модель многопроцессорной системы для оценки эффективности работы алгоритмов кэш-памяти. Это является актуальной задачей, поскольку оптимизация структуры и алгоритмов работы кэш-памяти позволяет ускорить взаимодействие процессора с памятью и, таким образом, повысить производительность всей системы. Приведена схема модели кэш-памяти мультимикропроцессора и описание ее реализации. Представлены зависимости производительности системы от разных способов организации кэш-памяти, полученные в результате моделирования. На основании анализа результатов моделирования показано, что эффективность работы многопроцессорной системы с кэш-памятью зависит не только от параметров кэш-памяти и выбранного алгоритма замещения, но и от класса решаемой задачи. Ветвящиеся программы с большим числом условных переходов, зависящих от случайных входных данных, дают неплохие результаты практически с любыми алгоритмами замещения. Программы, которые имеют большое число повторяющихся участков, например, часто вызываемых подпрограмм и/или циклов при прочих равных условиях обеспечивают более высокую эффективность использования кэш-памяти, чем ветвящиеся программы. Особенно сильно это проявляется при увеличении числа задействованных ячеек кэш-памяти.

***

1. Хорошевский, В.Г. Архитектура вычислительных систем: учеб.пособие для вузов/ В.Г. Текст] /Хорошевский. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 512 с.
2. Цилькер Б. Я Организация ЭВМ и систем [Текст]/ Б.Я.Цилькер Б. Я., С.А.Орлов - СПб: Питер, 2006 - 668 с.
3. Рудометов В. В., Семенов В. С., Анализ когерентности кэш-памятей для повышения эффективности тестирования подсистемы памяти. [Текст]//, - Москва: ИМВС РАН
4. Таненбаум, Э. Архитектура компьютера: пер. с англ. / Э. Таненбаум.- Изд. 5-е.- СПб., 2010. - 848 с. ISBN 5-469-01274-3.
5. Орлов, С.П.Методы имитационного моделирования многоуровневой памяти мультимикропроцессорных систем/ С.П.Орлов. – Труды 10-й всеросс. научно-практич. конф. «Компьютерные технологии в науке, практике и образовании», Самара, СамГТУ, 2011. - С. 76-78.
6. Герценбергер К.В., Чепин Е.В. Аналитическая модель оценки производительности многопроцессорной обработки данных для набора параллельных алгоритмических структур. Бизнес-информатика // Междисциплинар. науч.-практич. журн. 2011. № 4 (18). С. 24–30.

Никитенко Я.А., Доровской В.А.

**Тяговый электропривод безрельсового городского транспорта
в условиях города Керчь**

*ФГБОУ ВО «КГМТУ»
(Россия, Керчь)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-181

idsp: ljournal-12-2018-181

Аннотация

В данной работе рассмотрена система управления тяговым электроприводом безрельсового транспорта г. Керчь, поиск решения увеличения энергоэффективности данной системы.

Ключевые слова: Электротранспорт, тяговый электропривод, проектирование системы управления.

Abstract

The control system of traction electric drive for railless transport in Kerch, is reviewed the solutions to increase the energy efficiency of the system are sought.

Keywords : Electric transport, traction electric drive, control system design.

Введение. Городской электротранспорт относится к числу наиболее энергоёмких потребителей электрической энергии, его доля в общегородском потреблении составляет около 30%. Постоянное повышение стоимости энергоресурсов обуславливает необходимость повышения требований к качеству осуществления процессов управления тяговым приводом троллейбуса. Эти требования могут быть удовлетворены только путем внедрения современных ресурсосберегающих технологий, поэтому задачи разработки эффективных компьютеризованных систем управления электротехническими комплексами являются весьма актуальными и представляют как теоретический, так и практический интерес. Решению задач автоматизации управления процессом оптимизации электропривода посвящено значительное число научных и экспериментальных работ. Это обусловлено преимуществами метода бесконтактного управления тяговым приводом: возможностью реализации оптимального управления, минимизируя его потери электроэнергии, и возможностью реализации оптимального по быстродействию торможения троллейбуса. Реализация оптимального управления позволяет ужесточить требования к качеству ведения троллейбуса, снизить потребление электроэнергии, повысить качество и комфортабельность перевозки пассажиров за счет плавности хода троллейбуса.

1. Анализ результатов литературных исследований. Постановка проблемы.

В городе Керчи используется Реостатно-контакторная система управления тяговым электроприводом постоянного тока. В работе Корягина Е. Е., Коськин О. А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов. – М.: Транспорт. 1982. [1] приводятся общие сведения и технические характеристики электрических машин постоянного тока: “Все электрические машины, устанавливаемые на троллейбусах, делятся на две основные группы. К первой группе относятся тяговые двигатели, предназначенные для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую, необходимую для приведения в движение троллейбусов, ко второй группе относятся вспомогательные электрические машины – двигатели и генераторы. Вспомогательные двигатели служат для привода компрессоров, вентиляторов, генераторов низкого напряжения и других механизмов. Это двигатели в основном с последовательным возбуждением. Электрические машины с параллельным возбуждением получили большое распространение в качестве приводов групповых переключателей (контроллеров) и генераторов электроэнергии вспомогательных нужд, которые служат для питания электрооборудования низкого напряжения, цепей управления и для подзарядки аккумуляторных батарей. На троллейбусе обычно устанавливают один тяговый двигатель, рассчитанный на напряжение контактной сети 550 В.

В процессе работы двигатель нагревается, причем чем больше его нагрузка, тем больше потери мощности и нагрев электрической машины. Допустимая полезная нагрузка электрической машины ограничивается главным образом ее нагревом. По условиям нагрева машина может быть нагружена кратковременно больше, чем длительно. Полезная мощность, на которую рассчитана электрическая машина по условиям нагрева, называется номинальной. Работоспособность тягового двигателя в условиях резко меняющейся нагрузки ограничена не только его теплоотдачей, но и теплоемкостью. Поэтому для тяговых двигателей должна быть известна временная перегрузочная способность по условию нагревания, определяемая его теплоемкостью.

Тяжелые условия работы тяговых двигателей обуславливают особенности их конструкции. Конструкцию корпуса (остова) тягового электродвигателя увязывают с

общей конструкцией экипажа. Люки корпуса должны обеспечивать доступность к внутренним частям двигателя для обслуживания как в депо, так и на линии. Необходимость вписывания двигателя сравнительно большой мощности (до 150 кВт) в ограниченное пространство под кузовом подвижного состава требует значительного сокращения размеров двигателя и тем самым повышения его электромагнитных нагрузок.

Тяговый двигатель состоит из следующих основных частей: корпуса (остова), главных и добавочных полюсов, якоря, коллектора щеткодержателей со щетками, подшипниковых щитов. Для охлаждения двигателя предусмотрен вентилятор.

В данной СУ регулировка тока через двигатель осуществляется с помощью мощных сопротивлений, подключаемых контакторами. РКСУ обладает преимуществами и недостатками: Из-за того, что ДПТ имеет коллектор, то нужно обслуживать коллекторный щеточный узел. Так же проблема в защите его от сырости и влаги, а это достаточно сложно осуществить, по этим причинам двигателя выходили из строя. - Невозможность вернуть какую-то часть энергии при торможении в контактную сеть. - Из-за того, что используются пуско-тормозные реостаты для регулирования скорости происходит увеличение потерь на регулирование. Особенно это проявляется при низких скоростях. - Используется огромное количество контактных элементов, они в свою очередь требуют обслуживания и осуществляют коммутацию под током до 200 А. - В аварийных режимах ограничить токи не позволяет инертность систем токовой защиты. - Простота устройства и ремонта. - Большая электро- и пожаробезопасность. - Высокая легкость управления по сравнению контроллером водителя.

Постановка проблемы. Как мы видим из результатов анализа литературных источников что реостатно-контактная система управления тяговым электроприводом троллейбуса имеет значительные потери электроэнергии в результате мощных потребителей электроэнергии, которые имеют значительные тепловые потери, а также трудоемкое обслуживание различных узлов таких как коллекторно- щеточный переход двигателя, и контакторной системы. Нам необходимо заменить эту систему на более энергоэффективную.

2.Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение энергетической эффективности тягового электропривода городского безрельсового транспорта за счет замены действующей реостатно-контакторной системы тягового электропривода на более экономичную с учетом современных технологий используемых в науке и технике.

3.Методы и материалы исследования. В работе использованы аналитические и электротехнические методы, позволяющие спроектировать систему управления тяговым электроприводом безрельсового транспорта в условиях Восточно-крымского региона.

4.Результаты исследований. Одна из систем которая более эффективней может использовать потребляемую ею электроэнергию по сравнению с реостатно-контакторной системой, является безреостатная система тиристорно-импульсного управления (ТИСУ), которая строится на базе силовых GTO (Gate Turn Off) тириستоров. В такой системе необходимый по величине ток создаётся не коммутацией сопротивлений в цепи двигателя, а посредством формирования временной последовательности токовых импульсов заданной частоты и скважности. Изменяя эти параметры, можно изменять средний протекающий через тяговый электродвигатель (ТЭД) ток, а следовательно и управлять вращающим моментом ТЭД. Безреостатные системы разделяются на частотно-импульсные, широтно-импульсные и комбинированные [2,3]. Безреостатная система зарекомендовала себя как надёжная и экономичная система, и она используется на таких троллейбусах как ЗиУ-52642, БОГДАН Т 90110, МАЗ-103Т.

Наиболее перспективной для массового внедрения в городской электротранспорт системой управления тяговым приводом троллейбуса является система управления ТЭД переменного тока [4], ввиду высоких технико-экономических показателей и надёжности её работы. Упрощённая функциональная схема тягового асинхронного привода

представлена на рисунке 1. Фильтр ДН1 ДН2 Управляющий контроллер ОТД ОН АИН Датчик скорости + ЛК - DC 600 V I_g U_g I_{cl} U_{dc} i_{s1} i_{s2} i_{s3} Настройка и диагностика Система управления верхнего уровня С Контактная сеть Команды управления PWM FLT Тяговый преобразователь Драйверы и гальваническая розвязка ТАД М Рисунок 1 – Упрощённая функциональная схема тягового асинхронного привода.

Рисунок 1 – Упрощённая функциональная схема тягового асинхронного привода

Тяговые электромеханические системы на основе асинхронных двигателей являются более энергоэффективными и позволяют осуществить рекуперацию накопленной энергии обратно в контактную сеть при торможении, за что отвечает отделитель звена постоянного тока от контактной сети (ОТД). Однако такие системы требуют более дорогостоящего автономного инвертора напряжения (АИН) для питания асинхронного ТЭД и более сложных алгоритмов управления. В качестве силовых элементов используются IGBT-ключи. Современные тяговые преобразователи используют цифровые сигнальные процессоры в качестве управляющих устройств, позволяющие применять современные методы и алгоритмы управления для ТЭД переменного тока (синхронных и асинхронных). Контроллер с таким процессором осуществляет формирование режимов работы электропривода с заданными параметрами с помощью ШИМ (PWM), обработку сигналов защиты и аварийного отключения электропривода, приёма и передачи внешних управляющих, задающих и информационных сигналов. Для связи с другими устройствами системы используются надежные протоколы передачи данных: CANopen, ModBus и другие [5]. Система с микропроцессорным управлением имеет следующие преимущества: экономия электроэнергии до 25% (по сравнению с РКСУ); бесступенчатое регулирование скорости; движение при любой полярности напряжения (переключение происходит автоматически); дистанционное изменение направления движения (реверсирование); самодиагностика с выводом световой и звуковой информации на лицевую панель блока управления и панель управления в кабине водителя. Тяговый электропривод переменного тока производится такими мировыми компаниями как Medcom, Skoda Electric, Cegelec и Siemens, ABB, Alstom, Bombardier и т.д. Несмотря на свою существенную стоимость, троллейбусы с комплектными тяговыми электроприводами переменного тока пополняют ряды троллейбусного парка Украины: ЛАЗ-Е301 (ЭлектроЛАЗ-20, ElectroLAZ-20), АКМ-321, ЛАЗ Е183 (ЭлектроЛАЗ-12, ElectroLAZ-12).

5. Вывод В результате проведенных исследований реостатно-контакторной системы управления тягового электропривода являющейся основной системой безрельсового электротранспорта города Керчь, выявлено что она менее

энергоэффективна в результате больших тепловых потерь. Предложена наиболее перспективная для внедрения в городской электротранспорт система управления тяговым ТЭД переменного тока, на тиристорно-импульсном управлении как более энергоэффективная система управления.

6.Благодарность. Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой ЭСИАП кандидату технических наук, доценту Чёрному Сергею Григорьевичу за помощь подготовки материалов этих исследований

***

1. Корягина Е. Е., Коськин О. А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов. – М.: Транспорт. 1982. с – 4
2. Максимов А.Н. Городской электротранспорт: Троллейбус: Учебник для нач. проф. образования/ Анатолий Николаевич Максимов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
3. Ефремов И.С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчёт). Изд.3, исправленное и дополненное. Учебник для вузов по спец. «Городской электрический транспорт» / И.С. Ефремов М. «Высш. школа». 1969 488с с илл. 1л. вкл.
4. Король В. Особенности применения тягового асинхронного электропривода в составе рельсового транспорта. [Электронный ресурс]. – Механика Машин, Механизмов и Материалов. – 2012, № 1 (18)
5. Санников Н. Bombardier Transportation Современные транспортные решения для городской среды. [Электронный ресурс]. – Презентация для 1-го международного инвестиционного форума «Модернизация инфраструктуры российских городов: путь – 2018». – Москва, 5-6 июля 2012 г

Никитенко Я.А., Доровской В.А.

**Быстродействующие обратные связи в системах фазового управления
судовыми механизмами**

*ФГБОУ ВО «КГМТУ»
(Россия, Керчь)*

doi: 10.18411/lj-12-2018-182

idsp: ljjournal-12-2018-182

Аннотация

Схемы трехфазных выпрямителей применяются в основном для питания потребителей средней и большой мощности, равномерно нагружая сеть трехфазного тока, и отличаются высоким коэффициентом использования трансформатора. С целью обеспечения минимума неканонических гармоник, обусловленных несимметричностью сети и узлами синхронизации, необходимо обеспечивать равенство интервалов прохождения импульсов с синхронизацией с сетью питания. Целью данной работы является исследование эффективности использования систем фазового управления полупроводниковыми преобразователями электроэнергии с компенсацией влияния колебаний частоты для снижения этого влияния быстродействующими обратными связями. Наибольший эффект подавления наблюдается, если применяется астатический регулятор второго порядка. Смещение частоты среза ЛАЧХ регулятора в область высоких частот в пределах диапазона устойчивой работы преобразователя приводит к возрастанию коэффициента сглаживания возмущений. Это свойство является характерным для всех типов регуляторов, поэтому применительно к прецизионным структурам параметры регуляторов и их тип должны выбираться исходя из комплекса требований, обусловленных как требуемыми статистическими, так и динамическими показателями. Из выполненного анализа следует, что даже применение регуляторов высоких порядков не позволяет обеспечить подавление возмущения в выпрямленном напряжении до требований прецизионных систем электропитания.

Ключевые слова: частота, быстродействующие обратные связи, системы фазового управления, полупроводниковые преобразователи.

Abstract

Scheme-phase rectifiers are mainly used for power consumers medium and high capacity, uniformly loading the three-phase AC network, and a high utilization factor of the transformer. In order to ensure minimum noncanonical harmonics caused by asymmetry of the network nodes and the synchronization is necessary to ensure the equality of intervals synchronized with the passage of pulses from the supply mains. The purpose of this study is to investigate the effectiveness of the use of phase control systems, power semiconductor converters with compensation of the oscillation frequency to reduce influence of this effect quick feedbacks. The greatest suppression effect is observed if applied astatic regulator of the second order. Offset controller LACHH cutoff frequency to higher frequencies within the range of stable operation of the inverter leads to an increase in the coefficient of smoothing disturbances. This property is characteristic of all types of regulators, however with regard to precision structures regulators and their parameters must be chosen based on the type of complex requirements arising as a desired statistical and dynamic parameters. Analysis suggests that even the use of high-order controllers does not allow the disturbance suppression in the rectified voltage to the requirements of high-precision power supply systems.

Keywords : frequency, high-speed feedback, the phase control system, semiconductor converters

1. Введение. Система импульсно-фазового управления трехфазным тиристорным выпрямителем является важнейшим звеном промышленных установок. Схемы трехфазных выпрямителей применяются в основном для питания потребителей средней и большой мощности, равномерно нагружая сеть трехфазного тока, и отличаются высоким коэффициентом использования трансформатора. С целью обеспечения минимума неканонических гармоник, обусловленных несимметричностью сети и узлами синхронизации, необходимо обеспечивать равенство интервалов прохождения импульсов с синхронизацией с сетью питания. При использовании современной элементной базы узлы системы управления не могут вносить значительную несимметрию в последовательности управляющих импульсов. В современных электроэнергетических установках, где требуется большая точность поддержания качества электроэнергии, должны применяться специальные системы управления и регулирования полупроводниковыми преобразователями. На современном судне используется множество электрического оборудования, которые имеют мощности соизмеримые с мощностью самого генератора. При пуске и отключении асинхронных двигателей возникают проблемы с качеством электроэнергии. Провалы и всплески напряжения и частоты в судовой электросети во время пуска/отключения превышает в отдельных случаях нормы Морского Регистра в два раза [1]. Кроме того, колебания частоты приводят к нестабильности выходного напряжения полупроводниковых преобразователей электроэнергии. Поэтому актуальным является разработка эффективных структур и алгоритмов управления полупроводниковыми преобразователями электроэнергии для компенсации частоты колебаний напряжения.

2. Анализ результатов литературных исследований. Современные полупроводниковые преобразователи, а также прецезионные источники тока представляют собой многоконтурные замкнутые вентильные системы, построенные по принципу систем подчиненного регулирования [2, 3].

Известно [4], что частота среза любого внешнего контура в таких системах и его быстродействие значительно ниже, чем внутреннего контура. Поэтому можно утверждать, что эффективное подавление помех ниже граничной частоты преобразователя возможно лишь первым внутренним контуром, представляющим собой стабилизирующую обратную связь по напряжению.

Рассмотрим эффективность обратной связи (ОС) в плане подавления возмущения $\Delta\omega$ при различных типах применяемых регуляторов. Учитывая, что внутренняя ОС наиболее быстродействующая и, следовательно, пульсации выпрямленного напряжения оказывают достаточно сильное влияние на коэффициент передачи системы фазового управления (СФУ).

3.Цель и задачи исследования. Целью данной работы является исследование эффективности использования систем фазового управления полупроводниковыми преобразователями электроэнергии с компенсацией влияния колебаний частоты для снижения этого влияния быстродействующими обратными связями.

4.Методы и материалы исследования. При решении поставленных задач применялась теория электропривода, теория электрических машин, теория автоматического регулирования, а также методы математического моделирования. Численное решение уравнений математической модели проводилось с помощью пакета MathCAD на ПК.

4.Результаты исследований. Воспользуемся динамической моделью управляемого выпрямителя (УВ) с учетом фактора пульсации (рис. 1).

Рис. 1. Динамическая модель управляемого выпрямителя с учетом фактора пульсаций

Определим дисперсию и коэффициент сглаживания замкнутым контуром возмущения $\Delta\omega\phi$, описывающего колебания частоты на входе фильтра синхронизации со спектральной плотностью $G_\phi(\omega)$:

$$G_\phi(\omega) = \frac{\alpha_\omega}{\alpha_\omega^2 + \omega^2} R_{\omega\phi}(0), \quad (1)$$

где

$$R_{\omega\phi}(0) = \sigma_\omega^2 \left(\frac{\alpha_n}{f_0} \right)^2 = D_\omega.$$

Учитывая, что возмущение $\Delta\omega\phi$ в выходной параметр преобразователя передается через импульсный элемент и квантуется во времени (рис.1, а), воспользуемся дискретным преобразованием формулы (1).

Спектральная плотность дискретного процесса обычно определяется как двустороннее Z –преобразование от корреляционной функции [2.6,2.7].

$$G^*(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(kT_m) z^{-k}; \quad z = e^{j\omega T_m} \quad (2)$$

Для практического использования (2) удобнее его представить в виде:

$$G^*(z) = R^*(z) + R^*(z^{-1}) - R^*(0) \quad (3)$$

что позволит использовать таблицы Z-преобразования для нахождения дискретной спектральной плотности. Здесь $R^*(z)$ – Z-преобразование от корреляционной функции $R(\tau)$.

Для корреляционной функции $R(\tau)$, соответствующей спектральной плотности (1), используя (3) и таблицы Z-преобразований, находим:

$$G_{\omega}^*(z) = \frac{(1 - d_{\omega}^2)D_{\omega}}{(z - d_{\omega})(z^{-1} - d_{\omega})},$$

или

$$G_{\omega}^*(e^{j\omega T_m}) = \frac{(1 - d_{\omega}^2)D_{\omega}}{1 + d_{\omega}^2 - 2d_{\omega} \cos \omega T_m},$$

где

$$d_{\omega} = \exp(-a_{\omega} T_m).$$

Дисперсия выпрямленного напряжения, обусловленная помехой, определяется по формуле:

$$D_{U,\omega} = \frac{T_m}{2\pi} \int_{-\pi/T_m}^{\pi/T_m} G_{\omega}^*(z) |\phi^*(z)|^2 \Big|_{z=e^{j\omega T_m}}, \quad (4)$$

где

$$\phi^*(z) = \frac{K_B K_M}{1 + z^{-1} K_K T_m F W_p^*(z, 1)},$$

$$K_K = K_B K_M K_{CV} K_g K_p,$$

для регуляторов, в которых разность между полиномами знаменателя и числителя равна единице и

$$\phi^*(z) = \frac{K_B K_M}{1 + K_K T_m F W_p^*(z)},$$

если указанная разность больше единицы.

Подынтегральное выражение (4) является трансцендентной функцией переменной ω , что затрудняет интегрирование. Устранение указанных затруднений достигается заменой переменных [4]:

$$z = e^{j\omega T_m} = \frac{1 + jv}{1 - jv}; \quad \omega = \frac{2}{T_m} \operatorname{arctg} v; \quad d\omega = \frac{2}{T_m} \frac{dv}{1 - v^2}, \quad (5)$$

в результате которой (4) преобразуется к следующему виду:

$$D_{U,\omega} = \frac{T_m}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\omega}^*(z) |\phi^*(z)|^2 \Big|_{z=\frac{1+jv}{1-jv}} \frac{2dv}{1-v^2}. \quad (6)$$

Здесь ω – относительная псевдочастота.

Подынтегральное выражение (6) является дробно-рациональной функцией jv , поэтому вычисление $D_{U,\omega}$ с использованием этого выражения сводится к вычислению интеграла вида:

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(jv)dv}{b(jv)b(-jv)}, \quad (7)$$

где $b(jv) = b_0(jv)^k + b_1(jv)^{k-1} + \dots + b_k$ – полином, корни которого лежат в верхней полуплоскости комплексной плоскости;

$g(jv) = g_0(jv)^{2k-2} + g_1(jv)^{2k-4} + \dots + b_{k-1}$ – полином, содержащий четные степени v .

Воспользовавшись выражениями (1) – (7), определим характер зависимости выпрямленного напряжения от типов и параметров регуляторов внутреннего контура. Рассмотрим замкнутую структуру с регулятором, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{T_p p(T_2 p + 1)}.$$

Z-преобразованная передаточная функция замкнутого контура:

$$\phi^*(z) = \frac{K_B K_M (z-1)(z-d_2)}{(z-1)(z-d_2) + K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2)}, \quad d_2 = e^{-\frac{T_m}{T_2}}. \quad (8)$$

Находим передаточную функцию замкнутой системы в области относительной псевдочастоты, используя преобразование (5):

$$\phi^*(z) = \frac{2K_B K_M jv[jv(1+d_2)+1-d_2]}{(jv)^2 \left[2(1+d_2) - K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2) \right] + 2(1-d_2)jv + K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2)}. \quad (9)$$

Дисперсия выпрямленного напряжения, обусловленная колебаниями частоты сети, в соответствии с (5), (6) и с учетом (9) находится по формуле:

$$D_{U,\omega} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{8(1-d_\omega^2)D_\omega K_B^2 K_M^2 [(jv)^4(1+d_2)^2 - (jv)^2(1-d_2)^2] dv}{\left[1-d_\omega + j\omega(1+d_\omega) \right] \left\{ (jv)^2 \left[2(1+d_2) - K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2) \right] + 2(1-d_2)jv + K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2) \right\}}.$$

Приводя числитель и знаменатель к полиномам вида (9) и вводя обозначения

$$\begin{aligned} b_0 &= (1+d_\omega) \left[2(1+d_2) - K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2) \right], \\ b_1 &= 4(1-d_\omega d_2) - K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2)(1-d_\omega), \\ b_2 &= 2(1-d_2)(1-d_\omega) + K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2)(1+d_\omega), \\ b_3 &= K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2)(1-d_\omega), \\ g_0 &= (1+d_2)^2, \\ g_1 &= (1-d_2)^2, \\ g_2 &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

находим:

$$D_{U,\omega} = 8(1-d_\omega^2)D_\omega K_B^2 K_M^2 I_3; \quad I_3 = \frac{b_0 g_1 - b_2 g_0 + b_0 b_1 g_2 b_3^{-1}}{2b_0(b_0 b_3 - b_1 b_2)} \quad (11)$$

где I_3 – значение табличного интеграла (7).

Общее выражение (11) с учетом коэффициентов (10) громоздко и не позволяет установить физическую взаимосвязь между дисперсией $D_{U,\omega}$, параметром энергетического спектра d_ω и параметрами регулятора.

Воспользовавшись тем, что период квантования значительно меньше постоянных времени регулятора и энергетического спектра, примем:

$$d_2 \approx 1 - \frac{T_m}{T_2}, \quad d_\omega \approx 1 - \alpha_\omega T_m. \quad (12)$$

После ряда преобразований выражения (11) с учетом (12), а также используя характеристическое уравнение выражения (8), по которому найдено условие устойчивости замкнутого контура, находим:

$$D_{U,\omega} = \frac{D_{\omega} K_B^2 K_M^2 \alpha_{\omega} T_m \left(\alpha_{\omega} T_m + 2 \left(2 \frac{T_2}{T_m} - 1 \right) + \frac{T_m}{T_2} \right)}{\frac{T_m}{T_2} \alpha_{\omega} T_p + \alpha_{\omega}^2 T_m^2 + 2 \frac{T_m}{T_2} \left(2 \frac{T_2}{T_m} - 1 \right)}. \quad (13)$$

Выражение (13) дает нам минимально возможное значение дисперсии выпрямленного напряжения, обусловленное колебаниями частоты сети. Коэффициент сглаживания замкнутой структуры определяется по формуле:

$$K_C = \sqrt{\frac{\alpha_{\omega} T_p + \alpha_{\omega}^2 T_p T_2 + K_K F}{\alpha_{\omega} (\alpha_{\omega} T_p T_2 + T_p + T_2 K_K F)}}.$$

Полученное выражение (13) позволяют не только определять величину составляющей дисперсии выпрямленного напряжения $D_{U,\omega}$, но и дают возможность осуществлять коррекцию замкнутой системы с целью обеспечения минимума $D_{U,\omega}$. С учетом изложенного определим степень сглаживания составляющей $D_{U,\omega}$ выпрямленного напряжения при различных типах применяемых регуляторов.

Передаточная функция интегрального регулятора второго порядка имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{T_p^2 p^2} (T_2 p + 1).$$

Передаточная функция замкнутого контура в области относительной псевдочастоты:

$$\phi^*(j\nu) = \frac{4K_B K_M (j\nu)^2}{2 \left[2 + K_K F \frac{T_m T_2}{T_p^2} \right] (j\nu)^2 + 2K_K F \frac{T_m T_2}{T_p^2} (j\nu) + K_K F \frac{T_m^2}{T_p^2}}.$$

На рис. 2 представлена модель управляемого выпрямителя для исследования коэффициента сглаживания возмущения.

Рис. 2. Matlab-модель управляемого выпрямителя

Дисперсия выпрямленного напряжения с учетом (12) после ряда преобразований и несущественных упрощений может быть найдена по выражению:

$$D_{U,\omega} = \frac{D_{\omega} K_B^2 K_M^2 \alpha_{\omega} T_p^2}{4(K_K F T_2 - \alpha_{\omega} T_p^2)}.$$

Коэффициент сглаживания возмущения:

$$K_C = \frac{2}{T_p} \sqrt{\frac{K_K F T_2 - \alpha_{\omega} T_p^2}{K_B^2 K_M^2 \alpha_{\omega}}}.$$

ЛАЧХ замкнутого контура представляет собой полосовой фильтр с крутизной низкочастотного участка характеристики 40 дБ/дек, что позволяет даже при

несовпадении полосы «прозрачности» $\phi^*(j\bar{\nu})$ с частотным диапазоном возмущений осуществлять эффективное их подавление (рис.3).

Рис. 3. ЛАЧХ замкнутого и разомкнутого контуров при использовании интегрального регулятора

На рисунке обозначены: 1 – ЛАЧХ замкнутого контура при $K_p=1, T_p=20 \cdot 10^{-3}$ с; 2 – при $K_p=5, T_p=20 \cdot 10^{-3}$ с; 3 – при $K_p=5, T_p=20 \cdot 10^{-4}$ с; 4 – $K_p=5, T_p=2 \cdot 10^{-4}$ с; 5 – ЛАЧХ разомкнутого контура.

Рассмотрим инерционный регулятор с передаточной функцией вида:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{T_p} \frac{1}{p + 1/T_p}.$$

Рис. 4. ЛАЧХ замкнутого и разомкнутого контуров при использовании инерционного регулятора

Для этого типа регулятора выражение для составляющей дисперсии выпрямленного напряжения имеет вид:

$$D_{U,\omega} = \frac{D_\omega K_B K_M \left[(1+d_p)(1+d_\omega) \left(K_K F \frac{T_m}{T_p} - d_p + 1 \right) + (1-d_p)^2 (1+d_\omega) \left(K_K F \frac{T_m}{T_p} + d_p + 1 \right) \right]}{2 \left[\left(K_K F \frac{T_m}{T_p} + 1 \right)^2 - d_p^2 \right] \left(K_K F \frac{T_m}{T_p} + 1 - d_\omega d_p \right)}.$$

Учитывая, что для большинства практических случаев $T_p > T_m$ выражение для K_C представим в виде:

$$K_C = \sqrt{\frac{\left[2 + \frac{T_m}{T_p} (K_K F - 1) \right] (1 + K_K F) (1 + K_K F + \alpha_\omega T_p)}{\alpha_\omega T_p \left(2 - \frac{T_m}{T_p} \right) (1 + K_K F) \left[2 + \frac{T_m}{T_p} (K_K F - 1) \right]}}.$$

Рис. 5 иллюстрирует зависимость коэффициента сглаживания возмущения от параметров регулятора и угла α .

Рис. 5. Коэффициенты сглаживания замкнутых контуров при интегральном (а) и инерционном (б) регуляторах

Нелинейный характер $K_c = f(v)$ обусловлен нелинейностью преобразователя. Отметим, что нелинейный характер этой зависимости будет иметь место и при арккосинусной регулировочной характеристике преобразователя по причине нелинейного преобразования возмущения разомкнутым УВ.

Штриховые линии, изображенные на рис.5 иллюстрируют эффективность подавления Λ_ω в преобразователе с равно интервальной СФУ. Более низкие значения коэффициента сглаживания обусловлены большим уровнем дисперсии помех рассматриваемого типа на входе замкнутого контура.

На рис. 6 представлена модель системы подчиненного управления. Система имеет два контура обратной связи – по току и по напряжению, а также параллельное корректирующее звено. Частота среза апериодического звена TFN_0 при разомкнутом контуре управления равна 10 Гц, коэффициент усиления 40 дБ. При охвате этого звена единичной обратной связью по напряжению, а также добавления коэффициента пропорциональности (на рисунке обозначен Gain2), равного $\pi/6$, частотный диапазон расширяется. ЛАЧХ замкнутого контура имеет частоту среза порядка 300 Гц. Помеха в виде колебаний частоты напряжения в модели формируется генератором белого шума, пропущенного через фильтр. Поскольку регулировочная характеристика полупроводникового преобразователя электроэнергии имеет нелинейный характер, для учета этой нелинейности в модель введен блок cos1. Амплитуда шума, которая характеризует степень отклонения частоты напряжения от номинального значения, определяется значением коэффициента Gain1.

Рис. 6. Модель системы подчиненного управления

Добавление в модель системы управления фильтра Wf с частотой среза 50 Гц (LC-фильтр) и параллельного корректирующего усилителя TFN_1 с частотой среза 20

кГц привело к изменению характеристик системы. Далее в модель вводится внешнего контура регулятора тока. Регулятор тока имеет передаточную функцию Transfer Fcn – звено 2 порядка с частотой среза 1 кГц. ЛАЧХ замкнутой системы представлена на рис.7, а. После охвата системы главной обратной связью частота среза равна 40 кГц (рис.7, б). Анализ частотных характеристик показал, что замкнутая система подчиненного управления устойчива. Введение быстродействующих обратных связей позволило значительно уменьшить влияние колебаний частоты входного напряжения на качество выпрямленного напряжения, что подтвердило моделирование замкнутой системы автоматического управления.

Рис. 7. ЛАЧХ системы управления с регулятором тока (а) и с главной обратной связью (б)

Вывод. Наибольший эффект подавления наблюдается, если применяется астатический регулятор второго порядка. Смещение частоты среза ЛАЧХ регулятора в область высоких частот в пределах диапазона устойчивой работы преобразователя приводит к возрастанию коэффициента сглаживания возмущений. Это свойство является характерным для всех типов регуляторов, поэтому применительно к прецизионным структурам параметры регуляторов и их тип должны выбираться исходя из комплекса требований, обусловленных как требуемыми статистическими, так и динамическими показателями. Из выполненного анализа следует, что даже применение регуляторов высоких порядков не позволяет обеспечить подавление возмущения в выпрямленном напряжении до требований прецизионных систем электропитания.

Благодарность. Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой ЭСИАП кандидату технических наук, доценту Чёрному Сергею Григорьевичу за помощь подготовки материалов этих исследований.

***

1. Рябенкий В.М. Исследование провалов и всплесков напряжения в автономных электроэнергетических системах / В.М. Рябенкий, А.О. Ушкаренко, Нгуен Ван Тхань // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Київ, 2010. Ч.1. – С.182-186.
2. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов. М.: ОАО "Электросила", 2003. – 172 с.
3. Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

4. Филлипс Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М.:Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.
5. Ушкаренко О.О., Спекторенко Р.А., Світлинський К.В. Реалізація системи керування трифазним тиристорним випрямлячем з використанням автоматного програмування. // Електротехніка і електромеханіка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2007. – С. 87-91.

Научный журнал

**Тенденции науки и образования в современном мире
№45, 12.2018**

Декабрь 2018 г.
Часть 8

SPLN 001-000001-0389-LJ

Подписано в печать 03.02.2019. Тираж 400 экз.
Формат.60x841/16. Объем уч.-изд. л.5,06
Бумага офсетная. Печать оперативная.
Отпечатано в типографии НИЦ «Л-Журнал»
Главный редактор: Иванов Владислав Вячеславович