# СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

# ТРУДЫ ДЕВЯТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ПОСВЯЩАЕТСЯ 90-ЛЕТИЮ СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

> НОВОКУЗНЕЦК 25-26 НОЯБРЯ 2020 г.

УДК 621.34.001.2 (0758) A 18

Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды Девятой Всероссийской научно- А 18 практической конференции / Под общей редакцией В.Ю. Островлянчика, В.А.Кубарева. — Новокузнецк: изд-во СибГИУ, 2020 г. — 216 с., ил.

ISSN 2220-3699

Сборник труды Всероссийской содержит IXнаучнопрактической конференции, посвященной 90-летию СибГИУ. В докладах представлены результаты научных исследований и приложений практических ПО проектированию, созданию математических моделей, теоретических основ автоматизированного энергосберегающего электропривода традиционным и микропроцессорным управлением, решению проблем электроснабжения электрических установок и учета электрической Рассматриваются энергии. решения, ориентированные на применение в производстве учебном процессе.

Сборник предназначен для научных работников, инженернотехнических работников предприятий, преподавателей вузов, аспирантов и студентов.

Под общей редакцией: д.т.н., проф. Островлянчика В.Ю. к.т.н., доц. Кубарева В.А.

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2020

### ВВЕДЕНИЕ

В 2020 году Сибирский государственный индустриальный университет отмечает своё 90-летие. С 1930 года в стенах университета, а ранее Сибирского металлургического института были подготовлены тысячи специалистов, в TOM направлениям подготовки, специальностям И связанным электроприводом и электроникой. В настоящее время непрерывное совершенствование технологических процессов, развитие И требование повышения их технико-экономических показателей и безопасности труда вызывают необходимость совершенствования управления электроприводом технологическими систем И процессами целом. Α также подготовка современных навыками специалистов, работы c автоматизированными c электротехническими системами и современными мехатронными комплексами.

совершенствование Дальнейшее систем управления невозможно без значительного прогресса в области силовой и слаботочной электроники, вычислительной техники. Возможность использования микропроцессорной техники в системах управления является предпосылкой создания принципиально электромеханических систем, с новым более высоким уровнем автоматизации электропривода на основе микропроцессорного управления, эффективного как для его потребителей, так и для проектировщиков и изготовителей, и пока, к сожалению, не достигнутая в полной мере отечественной наукой.

Поэтому особое внимание уделяется не только прикладным применениям, но и также решениям, ориентированным на применение в учебном процессе.

Реквизиты оргкомитета: 654007 г. Новокузнецк Кемеровской области, ул. Кирова, 42. Телефоны: (3843) 78-44-14, (3843)74-89-87, факс (3843) 46-31-74, (3843)74-89-87; e-mail: <a href="mailto:confaep2020@mail.ru">confaep2020@mail.ru</a>

СЕКЦИЯ 1	
Теоретические аспекты и методология построения	
современного электропривода, подготовка и	
переподготовка инженерных и научных кадров	

УДК 621.313.333.2

# РАЗРАБОТКА МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМА ВАГОНА РАСКАЛЕННОГО КОКСА УСТК

# **Н.А. Александров, Д.Е. Модзелевский, Е.В. Жданов** Сибирский Государственный Индустриальный Университет, г. Новокузнецк

В данной работе предложена установка преобразователя частоты с активным выпрямителем напряжения. Рассмотрены варианты деления нагрузок электроприводов и выбран один из вариантов. Рассмотрен состав системы управления.

Ключевые слова: преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, модуль сетевого фильтра, рекуперация, ведущий-ведомый, командоконтроллер.

Назначение коксового цеха — производство кокса, соответствующего техническим условиям, путем спекания при высокой температуре без доступа воздуха угольной шихты. И получение попутных летучих продуктов коксования [1].

Для тушения кокса сухим способом предназначена установка сухого тушения кокса. Установка представляет собой цилиндрическую камеру, сверху в которую загружается раскаленный кокс и по мере опускания к трактам конвейеров, он тушится охлажденным теплоносителем в виде циркуляционного газа, поступающего в камеру снизу [1].

Подъем вагона раскаленного кокса осуществляется с помощью четырех двигателей. Каждая пара двигателей присоединена к двум редукторам, с помощью которых вращается барабан со стальным канатом (см. рисунок 1).

В данной статье необходимо решить следующие задачи:

– произвести модернизацию системы управления с заменой релейно-контакторной схемы на преобразователь частоты с активным выпрямителем напряжения;

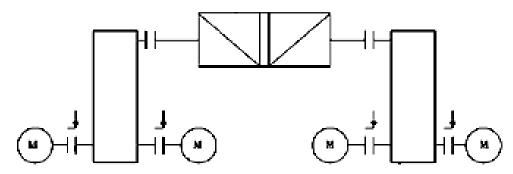


Рисунок 1 – Кинематические схемы подъемника №12 УСТК №4

- выбрать и обосновать структуру частотного электропривода, состав системы управления и их взаимодействие;
- заменить действующую систему управления
   электроприводами на управление с помощью контроллера;
- рассмотреть деление нагрузок между частотными электроприводами, которые связаны общим механическим валом;
- выбрать способ деления нагрузок между приводами.

На данный момент на подъемнике №14 УСТК №4 используется релейно-контакторная схема. Схема имеет ряд недостатков:

- контактная коммутация, требующая соответствующего обслуживания и ограничивающая срок ее службы;
  - ограниченное быстродействие;
- повышенные массогабаритные показатели и энергопотребление.

При замене релейно-контакторной схемы на преобразователь частоты исключаем просадки мощности питающей сети: в момент пуска электродвигателей на доли секунды возникают пусковые токи, превышающие номинальные в 6-8 раз при прямом пуске, и имеющие существенные скачки тока при регулировании скорости.

На УСТК предлагается применить многодвигательный привод на короткозамкнутых асинхронных двигателях (АД), взамен установленных изношенных асинхронных двигателей с фазным ротором. При работе электрических машин на общий вал возникает вопрос о равном распределении нагрузок между ними, а также о доведении технологического цикла до конца при выходе

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

одного из двигателей. В случае использования электродвигателей одинаковой мощности равномерное распределение нагрузок между ними при отсутствии системы деления нагрузок возможно только в случае строгой идентичности их механических характеристик. Это возможно только в случае равенства углов наклона механических характеристик [3].

При использовании электродвигателей различной мощности необходимо обеспечить распределение моментов между машинами пропорционально номинальной мощности. Для этого у электрических машин меньшей мощности крутизна характеристики должна быть больше [5].

Существенным недостатком данного решения является не идентичность механических характеристик электродвигателей одного типа. Четыре асинхронных двигателя связаны между собой механически, и это приводит к неравномерному распределению нагрузок между приводами в статических и динамических режимах работы, а значит, к перегрузке электродвигателя, обладающего более жесткой механической характеристикой (рис. 2).

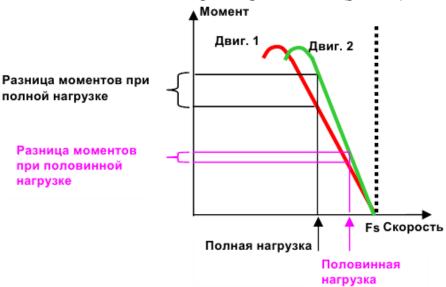


Рисунок 2 – Механические характеристики двигателей с разным наклоном при работе на один вал

Жесткость механической характеристики зависит от скольжения, которое в свою очередь определяется типом и характеристиками двигателя. При параллельном включении

двигателей, имеющих равные скорости идеального холостого хода и связанных общим механическим валом, нагрузка между ними распределяется пропорционально жесткости их механических характеристик.

Деление нагрузки нескольких частотно-регулируемых ведущий-ведомый приводов ПО системе осуществляется следующим образом: оба привода получают одинаковое задание скорости, кроме того Ведомый преобразователь частоты (ПЧ) ПЧ Ведущего получает также OT сигнал Ведомый ПЧ пропорциональный моменту. будет управлять двигателем таким образом, чтобы равномерно распределять нагрузку между двигателями.

#### Преимущества:

- быстродействующее и точное выравнивание нагрузки;
- полностью настраиваемая система.

#### Недостатки:

- требуется взаимосвязь приводов;
- при выходе из строя ведущего привода ведомые останавливаются.

нагрузки» Функция «выравнивания преобразователях В производства фирмы «Schneider Electric» частоты Altivar 71 искусственное скольжение, формируемое использует преобразователями частоты. Такой способ выравнивает нагрузку неидентичными двигателями c характеристиками, между поскольку пользователь по существу формирует искусственные характеристики.

## Преимущества:

- не требуется взаимосвязи между приводами;
- работа возможна со всеми законами управления в разомкнутой системе;
- настраиваются индивидуальные характеристики двигателей;
  - простота реализации.

#### Недостатки:

- выравнивание нагрузки между неидентичными двигателями будет ухудшаться с увеличением нагрузки (двигатель с более

жесткой характеристикой будет перегружен, тем больше, чем больше нагрузка ввиду нелинейности характеристик);

— нет автоматической компенсации неравномерности нагрузок между двигателями по скольжению при динамических изменениях характеристик.

Функция позволяет лучше распределить момент между четырьмя двигателями за счет изменения скорости в зависимости от момента, аналогично скольжению [4, 5].

Управление электроприводом осуществляется с помощью преобразователей двухзвенных частотных автономным (АИН) и напряжения инвертором активным выпрямителем (ABH) Schneider Electric. напряжения фирмы Активный напряжения производить выпрямитель рекуперацию электроэнергии в питающую сеть в моменты торможения.

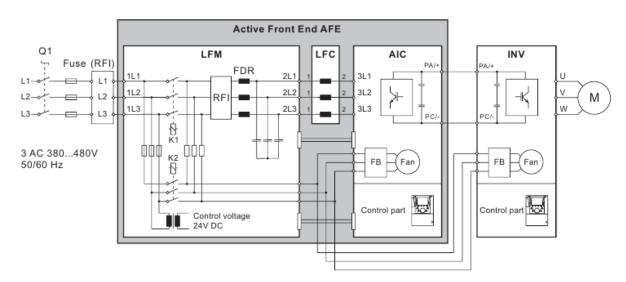


Рисунок 3 – Функциональная схема электропривода АД с ABH и AИH

Активный выпрямитель напряжения состоит из трех модулей (рис. 3), устанавливаемых на входе автономного инвертора напряжения, питающего двигатель. АВН содержит следующие элементы:

1. Модуль сетевого фильтра LFM, устанавливаемый на входе. Фильтр позволяет уменьшить гармоники тока с полным уровнем искажения меньше 10 - 16 %.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

- 2.Сетевой дроссель LFC, состоящий из трех однофазных дросселей. Сетевой дроссель защищает преобразователь частоты при коротких замыканиях на его выходе, ограничивая скорость нарастания тока короткого замыкания и необходим для работы ABH.
- 3. Активный выпрямитель напряжения АІС является выпрямительным устройством для преобразователя частоты, с помощью которого тормозная мощность может возвращается в сеть. Он обеспечивает работу электропривода в 4-квадрантном режиме и подходит для любых применений, в которых требуется генераторный режим работы. Он осуществляет двунаправленное преобразование энергии и обеспечивает постоянное напряжение питания вне зависимости от состояния нагрузки [4].

Функциональные возможности автономного инвертора напряжения в электроэнергии:

- возврат более 95% энергии обратно в сеть в тормозных режимах;
- реализация работы частотно-регулируемого привода в 4х квадрантах;
- обеспечение постоянства напряжения в звене постоянного тока вне зависимости от колебаний сетевого напряжения [4].

Система управления частотными приводами включает в себя командоконтроллер, панель оператора Magelis, тумблеры и кнопки пульта оператора с помощью которых машинист управляет процессом подъема. С этих органов управления приходят сигналы на корзину с контроллером, состоящую из блока питания, центрального процессора, блоков входов и выходов, блока связи.

Существует два режима управления: ручной И полуавтоматический. В ручном сам машинист управляет технологическим процессом, а в полуавтоматическом следит за выполнением цикла и разрешает переход на следующий этап с помощью команды разрешения. В этом же режиме скорость подъема контроллер определяет в зависимости от высоты подъема заданному технологическому циклу. Из-за особенности ПО конструкций необходимо подъемника использовать

установившиеся скорости подъема. Высоту вагона вычисляется на основании данных, полученных с абсолютного энкодера.

В ручном режиме работы командоконтроллер формирует 4 сигнала вперед и 4 сигнала назад. На блок входов одновременно приходит два сигнала с команда-контроллера — это движения вперед или назад и заданная скорость, всего 3 скорости: 10 Гц, 30 Гц и 50 Гц (рис. 4).

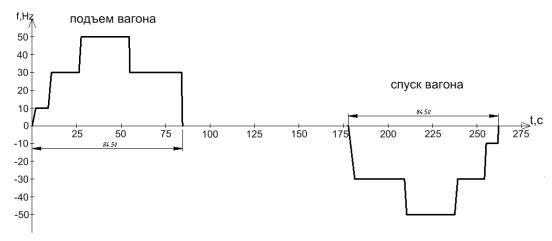


Рисунок 4 – Циклограмма электропривода подъемника №12 УСТК4

Контроллер с блока выходов подает на дискретные входа преобразователя частоты сигналы в виде 0 и 1, тем самым дает команды для пуска и выбора скорости для подъема/спуска. Для получения 4 скоростей необходимо сконфигурировать 2 и 4 скорости (PS4 и PS2) (рис. 5).

4 скорости LI (PS4)	2 скорости LI (PS2)	Задание скорости
0	0	Задание (1)
0	1	SP2
1	0	SP3
1	1	SP4

Рисунок 5- Заданные скорости преобразователя частоты

Выбранный способ деления нагрузок между несколькими электроприводами с помощью искусственного скольжения, формирует задание преобразователям частоты независимо друг от друга. Задание желаемого (искусственного) значения скольжения двигателя, производится при номинальном моменте.

Предложенные решения позволяют получить следующие преимущества:

- экономия электроэнергии за счет рекуперации энергии и компенсации активным выпрямителем реактивной мощности, потребляемой из сети (ориентировочно на 30 %);
  - снижение ударных нагрузок на механизмы;
- возможность регулирования скорости подъема/опускания и передвижения за счет замкнутой систему регулирования и высокоточного датчика высоты (абсолютного энкодера);
- возможность удаленной диагностики привода посредством промышленной сети;
- снижение акустического шума механизмов кинематической схемы [5].

Предложенная схема регулируемого электропривода удовлетворяет техническим требованиям. Электропривод позволит повысить качество управления электрическими машинами, увеличить срок службы, надежность оборудования и механизмов.

### Библиографический список

- 1. Азимов А.А. Машины и оборудование коксовых батарей и пекококсовых установок / А.А. Азимов М.: «Металлургия», 1980-88 с.
- 2. Анучин А.С. Система управления электроприводов: учебник для вузов / А.С. Анучин М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 375. с.:ил.
- 3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский М.: Академия, 2006. 272 с.
- 4. Активный выпрямитель напряжение Altivar AFE. Руководство по выбору ABH мощностью 120-160 кВт

[Электронный pecypc]. – Режим доступа: http://www.stekmaster.ru/assets/files/Schneider%20Electric/ATV\_AFE Catalogue ru.pdf.

5. Выравнивание нагрузки с помощью преобразователей частоты Altivar 71. Руководство пользователя. - 18c.

### УДК 622.6

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СКИПА ШАХТНОЙ ПОДЪЁМНОЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ

### М. Ю. Борщинский

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

В статье предлагается способ определения положения подъёмного сосуда в стволе, а также способ измерения колебательных движений длинного упругого каната. Использование такого устройства позволит реализовать новые алгоритмы управления шахтной подъёмной установкой (ШПУ) и повысит безопасность её работы.

Ключевые слова: шахтная подъёмная установка, положение, колебания, акселерометр, барометр, альтиметр, радиопередатчик.

Колебательные процессы в валах и нагруженных длинных канатах приводят к резкому возрастанию динамических нагрузок и к интенсивному износу канатов, механических соединений, валов, подшипников, силового электромеханического оборудования, к аварийному выходу из строя подъёмных сосудов, разгрузочных электродвигателей. Возрастает направляющих, вероятность аварий вынужденной возникновения c остановкой процесса. Актуальной остаётся производственного задача совершенствования систем управления на базе современных средств управления, микроэлектронных эффективных алгоритмов на базе новых знаний, способствующих улучшению качественных показателей ШПУ, износоустойчивости и увеличению межремонтных временных промежутков

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

В системах управления шахтными подъёмными установками определение положения скипа является необходимым условием для формирования закона управления и организации защит. Также при разработке систем управления и настройке режима работы установки необходимо обеспечить подъёмной минимальные динамические нагрузки В ГОЛОВНОМ канате. Организация непрерывного измерения динамических нагрузок в канатах и положения скипа в течение цикла подъёма позволит не только контролировать параметры работы полноценно установки для определения фактического режима его нагружения, но и повысит безопасность ее работы в целом.

На данный момент применяются системы управления с косвенным измерением положения скипа по углу поворота барабана подъёмной машины, поскольку угол поворота барабана пропорционален расстоянию, которое проходит подъёмный сосуд вдоль ствола.

Ha преимущественно шахтных подъёмных установках электромеханическими используются системы cаппаратами задания и контроля (АЗК), выдающими косвенную информацию о положении подъёмных сосудов, контактными и бесконтактными путевыми программными командоаппаратами (ППК). АЗК выдают непрерывную информацию, но из-за того, что вал аппарата присоединяется к барабану через понижающий редуктор, ошибка измерения для глубоких шахт превышает 1,5 метра [1].

Предлагаемый в работе [2] косвенный метод измерения с использованием цифровых фотоимпульсных датчиков обеспечивает существенное улучшение точности непрерывного слежение за местоположением подъёмного сосуда в стволе подъёмной установки.

Существуют системы измерения положения на основе каната [3]. На канат предварительно датчиков перемещения феррозондовые магнитные метки, наносятся a датчики, непосредственной близости установленные от шкива В считывают. Минимальная дискретность записи составляет 10 см.

Поскольку датчики расположены не на сосуде эти системы в принципе не в состоянии учитывать колебательные движения,

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

связанные с длинным упругим канатом, а также вытяжку каната, на котором зацеплен скип, достигающую величины десятков сантиметров.

Применение систем прямого измерения положения подъёмного сосуда возникающих В процессе И движения динамических нагрузок позволило бы каната получить информацию достоверную 0 текущем положении скипа использовать её в качестве сигнала обратной связи по положению, обеспечивая точную фиксацию сосуда в заданном месте ствола, а также обеспечить условия затухания колебаний на всех этапах подъёма.

B [4] предлагается применение импульсных радиодальномеров в качестве средства измерения положения скипа ШПУ. Радиодальномеры не чувствительны к пыли и газам, компактны и обладают необходимой точностью. К недостаткам можно отнести то, что предъявляются высокие требования к аппаратной быстродействию радиодальномера, части из-за радиотехнических подверженности измерительных систем помехам необходима дополнительная обработка сигнала, а также невысокое разрешение по дальности (несколько метров).

предлагается использовать акселерометрических и оптический датчик. Акселерометрические датчики устанавливаются на верхней площадке скипа и измеряют его вертикальные ускорения. Оптический датчик предназначены положения скипа определения В стволе относительно расстрелов шахтной армировки Результатом измерений являются единичные сигналы, устанавливающие моменты времени, когда в районе верхней смотровой площадки проходит расстрел. Сигналы с датчиков записываются в память устройства. После ручного быть использованы считывания ОНИ ΜΟΓΥΤ ДЛЯ оценки динамических усилий в канате и настройке тахограммы движения подъёмной установки. Недостатком этой системы является то, что измеряемые параметры не доступны в реальном времени, что не управления демпфировать позволяет системе колебания. Определения пути относительно расстрелов шахтной армировки даёт невысокую точность.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

Исходя из этого датчики прямого измерения должны удовлетворять самым высоким требованиям по защищённости и надёжности.

Анализ рассмотренных способов измерения механических параметров подъёма показал, что необходим поиск иных средств для измерения действительного положения подъёмного сосуда в стволе шахты и усилий в канате. При этом эти средства должна отвечать следующим требованиям:

- простота в установке и надёжность при эксплуатации;
- выдача достоверных данных о величине динамических нагрузок в головных канатах и положении подъёмного сосуда;
- получаемая при помощи аппаратуры информация должна быть доступна в реальном времени;
- низкое энергопотребление, так как предполагается использовать автономный источник питания.
- защищённый корпус, так как предполагается использовать устройство в жёстких промышленных условиях (наличие пыли, влаги);
- возможность работы в широком диапазоне температур.

предлагается данной статье применение цифрового барометра в качестве средства измерения положения скипа ШПУ. Для определения динамических усилий в канате, как и в работе [5] предлагается использовать акселерометр. Данные с датчиков после получения и обработки микроконтроллером передаются в систему управления ШПУ по радиоканалу. Устройство устанавливается на смотровой скипа, поэтому способно площадке измерять Питание устройства значения положения скипа. фактические автономное.

Функциональная схема устройства измерения параметров подъёма представлена на рисунке 1.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров



Рисунок 1 — Функциональная схема устройства измерения параметров подъёма

Высота определяется по принципу того, что с увеличением показателя высоты, атмосферное давление пропорционально уменьшается. То есть барометр представляет собой высотомер (альтиметр) и позволяет определять абсолютные и относительные высоты по изменению атмосферного давления. По соотношению параметров оптимальным оказался выбор датчика MS5611 с точностью измерения до 0,1 м, характеристика которого приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры датчиков

Параметры	MS5611	MPU-6050
Питание, В	1,8-3,6	2,375 - 3,46
Рабочий диапазон температур, °С	-40 – 85	-40 – 85
Ток потребления, мкА	12,5	500
Диапазон измерений	10 – 1200 гПа	± 2 ± 4 ± 8 ± 16 g ± 250 500 1000 2000 °/c
Интерфейс	I <sup>2</sup> C, SPI	$I^2C$

Для задачи измерения движения, фиксированного ускорения и низкочастотной вибрации скипа наиболее подходящим будет акселерометр с переменной ёмкостью.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

В качестве акселерометра с переменной ёмкостью выбран модуль с гироскопом, акселерометром и термометром на базе микросхемы MPU-6050, которая используется для определения положения в пространстве мобильных устройств (квадракоптеры, роботы). Акселерометр используется для измерения линейных скоростей. гироскоп угловых ускорений, a Совместное использование акселерометра и гироскопа позволяет определить трёхмерном пространстве. Параметры тела В движение микросхемы для сравнения также приведены в таблице 1.

Сбор, обработка и передача данных системе управления осуществляется микроконтроллером. Для применения в устройстве любой микроконтроллер, подойдёт имеющий возможность обмениваться информацией с акселерометром, барометром радиопередатчиком через интерфейс SPI/I<sup>2</sup>C. Всем перечисленным удовлетворяет микроконтроллер требованиям вполне STM8S103F3P6. Помимо этого МК имеет трёхуровневый конвейер расширенные возможности команд, аппаратное деление И управления питанием.

Чтобы обеспечить коммуникацию между измерительной частью и системой управления ШПУ необходимо использовать принцип связи, основанный на радиопередаче.

Передатчик должен иметь возможность передавать показания датчиков на расстояние не менее 1 км с достаточной скоростью. В качестве такового выбрана модель приёмопередатчика NRF24L01+ с малошумящим усилителем и усилителем мощности, обеспечивающими выходную мощность на уровне более 20dBm, с заявленной дальностью связи до 1100 метров.

Модуль радиосвязи работает на частоте 2,4 ГГц (трансивер) и Semiconductor. nRF24L01+ Nordic ОТ основан на чипе поддерживает передачу данных до 250Kb/s на расстояние до 1000 метров и может работать на 126 каналов, а также берет на себя формирование такие функции как пакетов, вычисление контрольной подтверждение суммы, приёма И даже автоматическую повторную передачу. При ЭТОМ различные энергосберегающие режимы позволяют экономно расходовать энергию, при работе от батарей.

На рисунке 2 показано расположение приёмопередающих антенн устройства, расположенного на скипе и устройства, расположенного на разгрузочной площадке.

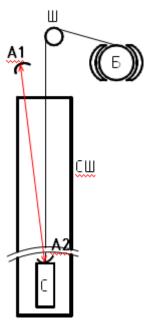


Рисунок 2 — Расположение антенн устройства Б — барабан, Ш — шкив, А1 — приемопередающая антенна на разгрузочной площадке, А2 — приемопередающая антенна на скпие, СШ — ствол шахты, С — скип

Таким образом, предложен способ измерения положения скипа и усилий в канате с помощью цифровых барометра акселерометра. Устройство даёт возможность выводить результат измерения в цифровом виде сразу в систему управления для дальнейшего использования в качестве сигнала обратной связи по положению, а также позволит реализовать более точную защит от аварийных режимов работы ШПУ. Использование информации с акселерометра поможет в уточнении математической модели колебательных процессов в канате и разработке новых алгоритмов управления, подавляющих колебательные и волновые процессы в нём.

## Библиографический список

1. Супрунов В.Ф. Привод постоянного тока шахтных подъёмных машин [Текст] / В.Ф. Супрунов. М.:, "Недра", 1978. – 213 с.

- 2. Кубарев В. A. Программируемый аппарат задания, технологических защит И контроля движения шахтной подъёмной установки (ПАЗК) [Текст] / XI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии", 29 марта - 2 апреля 2005 г. Труды в 2-х т. Т. 1- Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2005. с. 306-308.
- 3. А. с. 1312042 СССР Устройство для записи магнитных меток на канат грузоподъёмной машины/ М.Л. Кисельков, В.В. Андросов и С.С. Рочев //Бюл. 1987. № 19. -3 с.
- 4. Бакулев П. А. Радиолоакационные системы. М., Радиотехника,  $2004.-320\ c.$
- 5. Стрелков М.А, Зверев В.Ю., Трифанов Г.Д. Экспериментальные исследования влияния режима работы шахтных подъёмных установок на динамические нагрузки в канате // Горное оборудование и электромеханика. 2015. —№ 6. С. 21-25.

### УДК 621.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ КРАНОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ SIEMENS

# **Е.В. Жданов, Н.А. Александров, Д.Е. Модзелевский** Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Аннотация: в данной статье рассмотрены достоинства и недостатки современных крановых электроприводов постоянного и переменного тока, предложены рекомендации к применению того или иного вида электропривода в зависимости от требований и условий эксплуатации.

Ключевые слова: грузоподъемный кран, электропривод постоянного тока, электропривод переменного тока, преобразователь постоянного тока, частотный преобразователь.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

Грузоподъемный кран – машина циклического действия, предназначенная для подъема и горизонтального перемещения груза, удерживаемого грузозахватным устройством до момента разгрузки. Электромеханической системой, которая приводит в движение исполнительный механизм крана, является электропривод. Основное назначение электроприводов кранов – регулирование скорости подъема И скорости механизмов передвижения в некотором диапазоне.

Одним из главных элементов электропривода является электродвигатель. На приводах грузоподъемных кранов применяются следующие двигатели:

- электродвигатели постоянного тока;
- асинхронные электродвигатели с фазным ротором;
- асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки двигателей, используемых на грузоподъемных кранах.

Вид двигателей	Достоинства	Недостатки
Двигатели постоянного тока	- простота устройства и принципов управления; - практически линейные механические и регулировочные характеристики; - большой пусковой момент	- дороговизна изготовления; - износ и необходимость профилактического обслуживания щеточноколлекторных узлов; - необходимость в выпрямлении переменного тока
Асинхронные двигатели с фазным ротором	- большой начальный вращающий момент; - меньший пусковой ток по сравнению с электродвигателями с короткозамкнутым ротором	- большие габариты; - необходимость обслуживания коллекторно-щёточных узлов; - большие потери; - рывки канатов при переключении ступеней сопротивлений; - малый достигаемый диапазон регулирования

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

Вид двигателей	Достоинства	Недостатки
		скорости
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором	- дешевизна; - легкость конструкции простота изготовления; - высокий КПД и коэффициент мощности	<ul> <li>большой</li> <li>пусковой ток;</li> <li>сложное техническое</li> <li>оборудование для</li> <li>регулирования скорости</li> <li>вращения</li> </ul>

Электроприводы с двигателями постоянного тока широко распространены на кранах и подъемных установках, которые применяются в тяжелых условиях.

Электроприводы с асинхронными электродвигателями с фазным ротором получили наибольшее распространение на грузоподъемных кранах в советское время и используются в наши дни, однако, вследствие указанных выше недостатков, электрические привода с данными двигателями морально устарели и уступают по многим параметрам электроприводам с частотнорегулируемыми асинхронными короткозамкнутыми двигателями [1].

Стоит отметить, что электропривод грузоподъемных кранов имеет ряд особенностей, отличающих его от электроприводов других общепромышленных и специальных механизмов [2]:

- механические характеристики электропривода расположены во всех четырех квадрантах; желательное обеспечение плавного перехода приводной электрической машины из двигательного режима работы в генераторный режим при спуске;
- необходимость регулирования скорости в широком диапазоне (до 40:1);
- изменение температуры окружающей среды от −40° до +60°С;
- большая запыленность;
- высокая влажность воздуха (до 80 90%);
- влияние химических реагентов;
- механические воздействия: вибрации и удары;
- частое отсутствие своевременного и квалифицированного обслуживания;

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

жесткие требования в отношении простоты эксплуатации и надежности работы.

Промышленные предприятия в настоящее время модернизируют устаревшие и низкоэффективные электрические приводы кранов, устанавливая современенные преобразователи, которые выполняют следующие функции:

- изменение свойств электрической энергии сети и привидение её к необходимому для питания электродвигателей виду;
  - осуществление управления электродвигателями;
  - защита электродвигателей и самого преобразователя.

Передовым лидером в изготовлении современных и качественных преобразователей для электроприводов является компания Siemens, их серии преобразователей для крановых электроприводов постоянного тока — Sinamics DC Master, переменного тока — Sinamics G130 пользуются большим спросом на рынке и широко распространены на производствах.

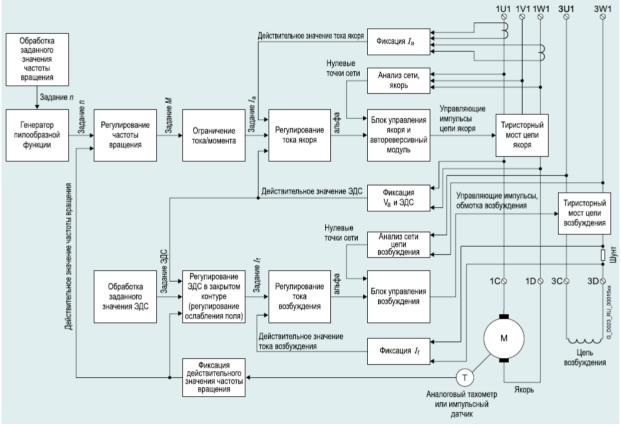


Рисунок 1 – Структура управления преобразователями Siemens серии Sinamics DC Master

Серия преобразователей Sinamics DC Master включает в себя преобразователь постоянного тока и управляющий модуль. Преобразователь имеет встраиваемые блоки для подключения к трехфазному источнику питания. Sinamics DC Master имеет тиристорные схемы выпрямления (рис. 1), необходимые для преобразования переменного тока сети в постоянный для питания якоря электродвигателя и его обмотки возбуждения [3].

Технические и экономические причины использования крановых электроприводов постоянного тока с с современными преобразователями:

- четырехквадрантный режим работы с возможностью рекуперации энергии в сеть;
  - непрерывная работа на низких оборотах;
- максимальный крутящий момент и малые пульсации момента даже на низких оборотах;
  - высокий пусковой момент;
  - высокая перегрузочная способность;
- широкий диапазон регулирования скорости с постоянной мощностью;
- малая потребность в месте для установки и небольшой вес;
- работоспособность даже при неидеальном состоянии механических узлов привода;
  - надежность.

Особенности электрических приводов постоянного тока:

- частое обслуживание двигателей постоянного тока;
- преобразователи постоянного тока из-за выпрямления тиристорной схемой являются генератором высших гармоник, что неблагоприятно сказывается на питающей сети и требует применение фильтрокомпенсирующих устройств;
  - высокие требования к питающей сети.

Серия преобразователей Sinamics G130 — универсальные преобразователи электроприводов переменного тока встраимого исполнения для индивидуальных приводов высокой мощности, основанные на частотном управлении асинхронными

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Преобразователи состоят из двух основных компонентов — силового модуля и модуля управления.

Принцип работы частотного преобразователя основан на выпрямлении входного синусоидального напряжения с постоянной амплитудой и частотой выпрямителем, дальнейшим фильтрованием напряжения и обратным преобразованием инвертором постоянного напряжения в переменное с изменяемой частотой и амплитудой [4].

На рисунке 2 приведена принципиальная структура частотного преобразователя Siemens серии Sinamics G130.

Система управления преобразователя предлагает высококачественное векторное регулирование с управлением скоростью и током.

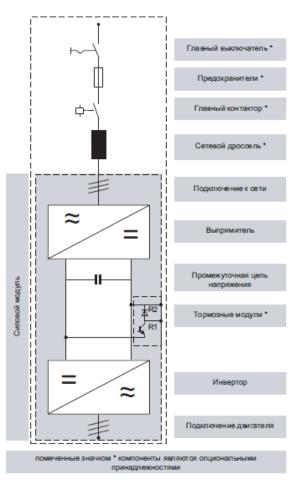


Рисунок 2 – Принципиальная структура частотного преобразователя Siemens серии Sinamics G130.

Технические и экономические причины использования крановых электроприводов переменного тока с с современными преобразователями частоты:

- высокая точность регулирования;
- большой пусковой момент;
- возможность удаленной диагностики привода по промышленной сети;
  - повышенный ресурс оборудования;
  - высокий КПД;
  - высокое быстродействие.

Особенности электрических приводов переменного тока с частотными преобразователями [5]:

- создание преобразователем помех, требующее применение высокочастотных фильтров;
- сравнительно высокая стоимость преобразователей на большую мощность;
- наличие квалифицированного персонала, способного производить наладку преобразователя;
- узкий температурный диапазон эксплуатации преобразователя;
- высокие требования к состоянию механических узлов электропривода.

Обобщая сказанное, выше если предполагается продолжительная работа электродвигателя на низкой скорости, частые динамические разгоны и торможения, необходим широкий диапазон скоростей при постоянной мощности, если кран работает климатических тяжелых условиях cПЛОХИМ состоянием механических узлов приводов, то рекомендуется использование электропривода постоянного тока. На электроприводе кранов переменного тока стоит останавливать выбор когда возможности частого обслуживания электродвигателей, важен повышенный ресурс и при небольшой и средней мощности электроприводов.

## Библиографический список

- 1. Современные крановые электроприводы. [Электронный ресурс]: Электрон. дан. Режим доступа: <a href="https://dvesta.com/technical-solutions/sovremennye-kranovye-elektroprivody/">https://dvesta.com/technical-solutions/sovremennye-kranovye-elektroprivody/</a>, свободный. (дата обращения: 08.11.2020)
- 2. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск 12. Проектирование электроприводов крановых механизмов. Schneider Electric. 2009. 48 с.
- 3. Sinamics DCM. Преобразователь постоянного тока, управляющий модуль. Siemens. 2019. 185 с.
- 4. Sinamics G130. Руководство по эксплуатации. Siemens. 2009. 488 с.
- 5. Электропривод постоянного и переменного тока, сравнение основных характеристик приводов в промышленном применении. [Электронный ресурс]: Электрон. дан. Режим доступа: <a href="http://www.intechnics.ru/article14.htm">http://www.intechnics.ru/article14.htm</a>, свободный. Загл. с экрана. (дата обращения: 10.11.2020)

УДК 681.518.2:681.511.42

# ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЕМ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО РЕЛЕ ФИРМЫ ОВЕН

# В. А. Кубарев, О. Р. Галлямов, А. О. Сарсембин, Т. В. Богдановская, А. М. Гуров

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Приведена структура и описание программно-аппаратной лабораторной установки для обучения основам программирования интеллектуальных реле в системах управления.

Ключевые слова: система технологической автоматики и защит, система логического управления, электропривод

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

В настоящее время всё больше работодателей обращают внимание на время интеграции выпускников вузов в производство. Для уменьшения длительности этапа «входа» выпускника в работу значительное время при обучении, должно уделяться практической подготовке, а также выполнению лабораторных и практических работ, что требует хорошей лабораторной базы.

В Сибирском государственном индустриальном университете на кафедре электротехники, электропривода и промышленной электроники на базе приборов ОВЕН, разработана лабораторная установка для проведения лабораторных работ по направлениям подготовки «Электроэнергетика и электротехника» и «Промышленная электроника».

Предлагаемая лабораторная установка позволяет на примере простой системы водоснабжения научиться разрабатывать программу для управления простой системой, освоить работу с дискретными и аналоговыми входами и выходами реле ОВЕН ПР200, и панелью оператора ОР-320Ф. Кроме того, студенты получают навыки программирования на языке FBD, и работе в среде Owen Logic.

В качестве системного программного обеспечения для программирования предлагаемой установки применяется программное обеспечение Owen Logic, а для конфигурирования графической панели оператора — программное обеспечение «OP Tool Editor».

Блок-схема лабораторного стенда на базе программируемого реле ПР200 фирмы Овен представлена на рисунке 1.

В состав лабораторной установки входят следующие элементы:

- 1. Программируемое реле ПР200;
- 2. Блок расширения дискретных каналов ОВЕН ПРМ-24.1;
- 3. Одноканальный источник питания ОВЕН БП60Б-Д4-24;
- 4. Текстовая панель оператора ОР-320А;
- 5. Ёмкость с установленными в ней датчиками уровня и температуры воды;
- 6. Термосопротивление ОВЕН ДТС125-50.В2.60;
- 7. Датчик уровня поплавковый ПДУ-2.1 (ДУ1);
- 8. Датчик уровня поплавковый двухуровневый ПДУ-2.2 (ДУ2);

- 9. Преобразователь давления ОВЕН ПД100 (ДД);
- 10. Нагреватель воды;
- 11. Автоматический преобразователь интерфейсов USB/RS-485 RSX4-4.1;
- 12. Контакторы КМИ малогабаритные  $I_H = 9A$ ;
- 13. Насосы повышения давления Oasis;
- 14. Соленоидный клапан СК-11-15 для управления потоком жидкости (СК);
- 15. Панель управления с установленными на ней сигнальными лампами и кнопками;
- 16. Персональный компьютер рабочее место обучающегося (ПК) с установленными на нём средой программирования Owen Logic и конфигуратором панели OP-320A.



Рисунок 1 — Блок-схема лабораторной установки, на основе программируемого реле ОВЕН ПР200

Применение программируемого реле ПР200, со средой программирования Owen Logic, предназначенного для

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

использования в системах управления реального времени [1], позволяет реализовать программу управления, полностью реализующую управление таким объектом как система теплоснабжения.

Текстовая панель оператора OP-320A позволяет отображать на экране ход выполнения технологического процесса и редактировать значения параметров, отвечающих за функционирование системы. Связь панели управления и реле ПР200 осуществляется по интерфейсу RS-485.

В качестве объекта управления используется ёмкость с установленными в ней датчиками уровня и температуры воды. Два поплавковых датчика уровня типа ПДУ позволяют реализовать контроль над уровнем жидкости, при этом датчик ДУ1 работает в качестве аварийного, и в случае его срабатывания для избегания перелива напрямую подаётся сигнал на отключение контакторов насосов и нагревательного устройства. Для управления потоком жидкости применяется соленоидный клапан типа СК-11-15;

Для измерения температуры используется термосопротивление ДТС125-50.В2.60. Для питания панели и блока управления вентилятором стабилизированным напряжением используется блок питания БП60Б-Д4-24.

На базе представленного стенда планируется создание и в будущем проведение лабораторных работ по следующим темам:

- 1. Лабораторная работа «Изучение программируемого реле» изучение программируемого реле ПР200 и модуля ПРМ-24.1. Ознакомление с средствами индикации на базе панели ОР-320A.
- 2. Лабораторная работа «Ознакомление с панелью оператора OP-320A и программой-конфигуратором» разработка страниц визуализации для панели OP-320A, работа с кнопками, создание простейшего человекомашинного интерфейса.
- 3. Лабораторная работа «Построение системы управления отоплением с учётом возможного возникновения аварийных ситуаций» разработка программы управления насосами и нагревателем с заданными

параметрами технологического процесса, и разработка интерфейса для панели.

Необходимо отметить, что оборудование фирмы Овен, активно применяется различными фирмами при разработке проектов автоматизации различных систем, и заслужило большое количество положительных отзывов, а более чем 20-летнее применение показало его достаточно высокую надёжность [2].

### Литература

- 1. Устройство управляющее многофункциональное ПР200. Руководство по эксплуатации. М.: Овен. 2020 г. 74 с. (версия 1.52)
- 2. Каталог проектов и решений на базе оборудования OBEH: содержит сведения о проектах выполненных на основе приборов OBEH. URL: <a href="https://owen.ru/project">https://owen.ru/project</a>. Загл. с экрана (дата обращения 10.11.2020 г.).

УДК 621.3.078

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОКАТНОГО ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА ПО СИСТЕМЕ «ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

## В.А. Кузнецов, Н.С. Зайцев, Е.С. Кузнецова

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

В работе осуществляется построение имитационной модели системы автоматического управления (САУ) синхронным двигателем (СД) главного электропривода толстолистового стана на основе её математического описания. Приводятся полученные динамические характеристики.

Ключевые слова: главный электропривод толстолистового стана, система автоматического управления, имитационное моделирование,

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

синхронный электропривод, динамические характеристики, качественные показатели.

Общеизвестно, ЧТО электропривод постоянного В отечественных прокатном производстве промышленных предприятий до недавнего времени был доминирующим [1, 5]. Однако за последние два десятилетия благодаря интенсивному силовой электроники появилась развитию возможность применения наиболее оптимальных по своим характеристикам частотно-регулируемых электроприводов (ЭП) переменного тока сверхбольшой мощности. Начиная с 2012 г. в России были введены эксплуатацию три мощных листопрокатных использованием ДЛЯ вращения валков прокатных клетей синхронного электропривода [1-4]. Одним из примеров может послужить главный ЭП толстолистового прокатного стана 5000, OAO «Магнитогорский установленного предприятии на металлургический комбинат» [2, 3]. В качестве источника питания синхронного двигателя используется преобразователь частоты типа MV7000 (3-уровневый NPC-преобразователь (Neutral Point Clamped - с фиксированной нейтральной точкой) с промежуточным звеном постоянного тока, который посредством импульсной модуляции (ШИМ) генерирует выходное напряжение. В предложенной схеме реализовано векторное управление СД. электроприводом Система управления представляет многоконтурную систему подчиненного регулирования скорости вращения двигателя с локальными обратными связями в контурах.

Несмотря на общеизвестные преимущества как самого СД, так и частотно-регулируемого ЭП перед приводом постоянного тока: больший КПД, меньший момент инерции, сокращение требуемой площади для установки оборудования, отсутствие щеточно-коллекторного узла и т.д., синхронный электропривод имеет недостатки, которые требуют серьезного изучения с использованием современной базы (например, математического и имитационного моделирования). Проблемы синхронного электропривода и способы их решения в отечественной литературе в краткой форме отражены в работах [2, 3], а также в наиболее ёмком виде в труде [6].

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

В предложенной работе выполнено математическое описание синхронного электропривода, построены имитационные модели электродвигателя и САУ, выполнен анализ полученных осциллограмм.

Для моделирования используется СД импортного производства, параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Заводские и расчетные данные оборудования

Наименование параметра	Обозначение	Значение	
	в среде		
	MATLAB		
Синхронный двигате	ль VEM DMMY.	Z 3867-20V	
Номинальная мощность	P	12 MB <sub>T</sub>	
Максимальный ток	Im	5650 A	
Номинальный ток	In	2460 A	
Номинальная угловая скорость	wn	6,283 рад/с	
Максимальная угловая скорость	wm	12,04 рад/с	
Номинальный момент на валу	Mn	1910 <b>МН</b> · м	
Максимальный момент на валу	Mm	4297 <b>МН</b> · м	
Момент инерции	J	145 <b>т</b> ·м <sup>2</sup>	
Число пар полюсов	Zp	10	
Номинальный ток возбуждения	Ifn	898,1 A	
Максимальный ток возбуждения	Ifm	1680 A	
Сопротивление фазы статора	Rs	0,00957 Ом	
Сопротивление фазы ротора	Rf	0,19097 Ом	
Пост. времени статора по оси d	Tsd	1,44 c	
Пост. времени статора по оси q	Tsq	1,26 c	
Преобразовате	ль частоты М	V7000	
Напряжение на выходе	Uxx	3300 B	
Тиристорн	ый возбудител	ь	
Напряжение холостого хода	Uxxv	520 B	
Номинальное напряжение	Unv	220 B	
Датчики			
Управляющий сигнал	Uy	10 B	
Коэффициент ОС по скорости	Kw	0,8304 B·c	
Коэффициент ОС по току	Kt	0,0018 B/A	
Коэффициент ОС по моменту	km	2,33·10 <sup>-6</sup> B/(H·м)	
Коэффициент ОС по потокосцеплению цепи ОВ	Kvf	0,0086 В/Вб	
	2.4		

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

Для составления структурной схемы синхронного двигателя можно воспользоваться системой уравнений Парка-Горева в операторной форме, приведенной в работе [6]:

$$\begin{cases} u_{sd} = i_{sd} R_s + p \psi_{sd} - \omega_0 \psi_{sq}; \\ u_{sq} = i_{sq} R_s + p \psi_{sq} + \omega_0 \psi_{sd}; \\ u_f = R_f i_f + p \psi_f; \\ \psi_{sd} = i_{sd} L_{sd} + i_f M_f; \\ \psi_{sq} = i_{sq} L_{sq}; \\ \psi_f = \frac{3}{2} i_{sd} M_f + i_f L_f; \\ M = \frac{3}{2} Z_p \left( \psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd} \right); \\ M - M_c = Jp \omega. \end{cases}$$
(1)

где  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$ ,  $u_f$  — напряжения статора по осям d, q соответственно и напряжение обмотки возбуждения;  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $i_f$  токи статора по осям d, q соответственно и ток обмотки возбуждения;  $\psi_{sd}$ ,  $\psi_{sq}$ ,  $\psi_f$  — потокосцепления статора по осям d, q возбуждения; обмотки соответственно И потокосцепление  $L_{sd}$ ,  $L_{sq}$ ,  $L_f$  — индуктивности статора по осям d, q соответственно и обмотки возбуждения;  $M_f$  – индуктивность взаимная индуктивность ОВ и обмотки статора по оси d; M и  $M_{\rm c}$  – момент на валу двигателя и статический соответственно.

Структурная схема синхронной машины может быть получена путем разрешения системы уравнений (1) относительно выходных координат  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $i_f$ ,  $\psi_f$ ,  $\psi_{sq}$ ,  $\psi_{sd}$ , M и  $\omega$ :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1/R_s}{1+pT'_{sd}} \cdot \left(u_{sd} + K_f R_f i_f - u_f K_f + \omega_{0.3\pi} \psi_{sq}\right); \\ i_{sq} = \frac{1/R_s}{1+pT_{sq}} \cdot \left(u_{sq} - \omega_{0.3\pi} \psi_{sd}\right); \\ i_f = \frac{\psi_f}{L_f} - \frac{3}{2} i_{sd} K_f; \\ \psi_{sd} = i_{sd} L'_{sd} + K_f \psi_f; \\ \psi_{sq} = i_{sq} L_{sq}; \\ \psi_f = \frac{1+pT_f}{T_f} \cdot \left(u_f + \frac{3}{2} R_f K_f i_{sd}\right); \\ M = \frac{3}{2} Z_p \left(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}\right); \\ \omega = \frac{1}{J_p} \cdot (M - M_c); \\ \omega_{0.3\pi} = \omega_0 Z_p. \end{cases}$$

$$(2)$$

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

где  $K_f$  — коэффициент отношения:  $K_f = \frac{M_f}{L_f}$ ;  $T_{sq}$  — постоянная времени статора по оси q:  $T_{sq} = \frac{L_{sq}}{R_s}$ ;  $L'_{sd}$  — индуктивность обмотки статора по оси d:  $L'_{sd} = L_{sd} - \frac{3}{2} \frac{M_f^2}{L_f}$ ;  $T'_{sd}$  — постоянная времени статора по оси d:  $T'_{sd} = \frac{L'_{sd}}{R_s}$ .

Построенная в программе MATLAB Simulink на основании системы уравнений (2) модель приводится на рисунке 1.

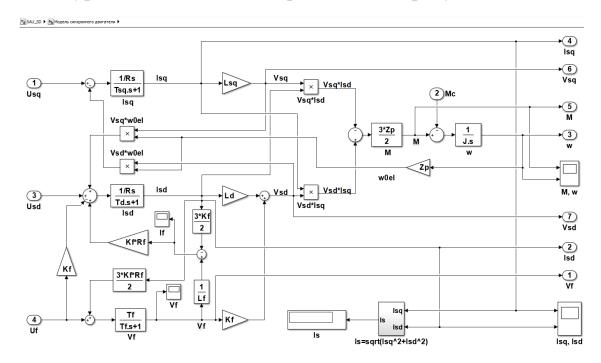


Рисунок 1 – Имитационная модель синхронной машины

В данной работе рассматривается построение двухконтурной САУ с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости. Для создания сигнала задания на контура токов и потокосцепления ОВ в разомкнутом контуре момента используются блоки нелинейности БН1-БН3 (представлены на рисунке 2).

Для удобства в таблицу 2 сведены основные данные о настройке контуров.

Таблица 2 – Сведения о настройке контуров САУ

Контур		Регулятор	Настройка
Тока	$I_{sq}$	Пропорционально-интегральный	Модульный оптимум
	$I_{sd}$	Пропорционально-интегральный	Модульный оптимум
Потокосцепления ОВ $\Psi_f$		Пропорционально-интегральный	Модульный оптимум
Момента <b>М</b>		Блок нелинейности №1 (БН1) $i_{sq} = f(M)$	_ Разомкнутый контур
		БН2 $i_{sd} = f(M)$	
		БНЗ $\psi_f = f(M)$	
Скорости ω		Пропорционально-интегральный	Симметричный оптимум

Математические выражения для регуляторов тока  $W_{\text{рт},q}(p)$  и  $W_{\text{рт},d}(p)$ , потокосцепления  $W_{\text{рпв}}(p)$ , скорости  $W_{\text{рс}}(p)$  и блоков нелинейности БН1-БН3 сведены в систему уравнений (3). САУ синхронным двигателем представлена на рисунке 2.

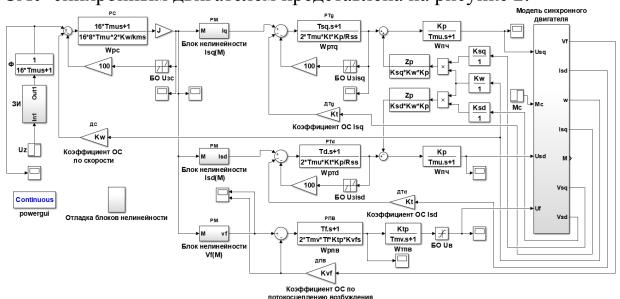


Рисунок 2 – Имитационная модель САУ синхронным электроприводом валков толстолистового стана

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

$$\begin{cases} W_{\text{pT},q}(p) = \frac{T_{sq}p+1}{2T_{\mu\nu}K_{T}K_{\Pi}}; \\ W_{\text{pT},q}(p) = \frac{T'_{sd}p+1}{2T_{\mu\nu}K_{T}K_{\Pi}}; \\ W_{\text{pT},q}(p) = \frac{T_{sd}p+1}{2T_{\mu\nu}K_{T}K_{\Pi}}; \\ W_{\text{pR}}(p) = \frac{T_{f}p+1}{2T_{\mu\nu}T_{f}K_{TRB}K_{Bf}p}; \\ W_{\text{pc}}(p) = \frac{16T_{\mu\nu}p+1}{16\cdot8T_{\mu\nu}^{2}p_{KM}^{K_{\omega}}}; \\ i_{sq} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{M^{2}}{\left(\frac{3}{2}z_{p}\psi_{s}\right)^{2}\psi_{s}^{2}}}} \frac{M}{\left(\frac{3}{2}Z_{p}\psi_{s}\right)^{2}}; \\ i_{sd} = \frac{L_{sq}}{\psi_{s}\sqrt{1+\frac{M^{2}}{\left(\frac{3}{2}z_{p}\psi_{s}\right)^{2}\psi_{s}^{2}}}} \frac{M^{2}}{\left(\frac{3}{2}z_{p}\psi_{s}\right)^{2}}; \\ \psi_{f} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{M^{2}}{\left(\frac{3}{2}z_{p}\psi_{s}\right)^{2}\psi_{s}^{2}}}} \left[L_{f}I_{fH} + \frac{L'_{sd}L_{sq}}{K_{f}\psi_{s}} \frac{M^{2}}{\left(\frac{3}{2}z_{p}\psi_{s}\right)^{2}}\right]. \end{cases}$$

где  $\psi_s = \psi_{shom} = \frac{2M_{\rm H}}{3Z_pI_{\rm H}}$  — номинальное потокосцепление статорной обмотки;  $I_{fh}$  — номинальный ток возбуждения.

На рисунке 3 представлен переходный процесс при холостом ходе двигателя, на рисунках 4.а и 4.б — разгон синхронного ЭП при приложении номинального  $M_{\rm H}$  и максимального  $M_{m}$  момента — процесс захвата металла в валки.

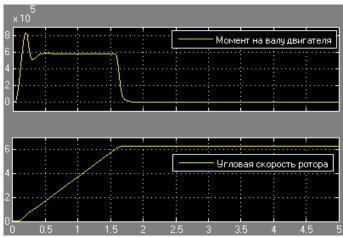
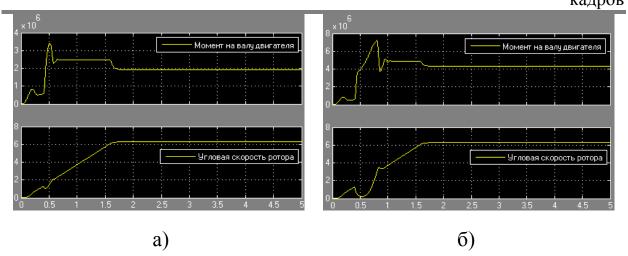


Рисунок 3 – Сигналы момента и скорости ротора при отсутствии на валу нагрузки и  $\omega = \omega_{\rm H}$ 

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных канров



- а) подача номинального момента  $M_{\rm H} = 1910~{\rm MH} \cdot {\rm M}$
- б) подача максимального момента  $M_m = 4297 \; \mathrm{MH} \cdot \mathrm{M}$

Рисунок 4 — Сигналы момента и скорости вала при подаче нагрузки в процессе пуска электропривода

**Выводы.** При рассмотрении рисунков 3 и 4.а-б отмечаются следующие качественные показатели: отсутствие перерегулирования и колебательности по скорости в системе. Перерегулирование по моменту составляет  $\sigma_M^{\%} = 42,5\%$ , что соответствует типовой настройке [6]. Полученные характеристики системы сохраняются во всем диапазоне момента  $M = 0 \div M_m$ .

Таким образом, можно сделать вывод о правильности полученных в работе зависимостей (2) и (3) и целесообразности их использования для построения типовых систем синхронного электропривода.

Анализ осциллограмм показывает недостатки синхронного электропривода, для устранения которых требуются дальнейшие исследования аппаратной и программной части САУ.

#### Библиографический список

1. Фединцев В.Е. Электрооборудование цехов ОМД. Ч. 2. Электропривод прокатных станов и вспомогательных механизмов цехов ОМД: учебное пособие / В.Е. Федницев. – М.: МИСиС, 2005. – 119 с.

- 2. Гасияров, В.Р. Математическое описание главного электропривода толстолистового стана 5000 горячей прокатки / В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2, №3. с. 62-66.
- 3. Маклаков, А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клети толстолистового стана 5000 / A.C. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.  $-2013. N \cdot 1. c. 43-50.$
- 4. Основные проблемы двухдвигательного электропривода прокатных станов / В.А. Кузнецов, Е.С. Кузнецова, Д.А. Лузин, Н.С. Зайцев // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции, 27 июня 2020 г. Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2020 г. С. 81-86
- 5. Фотиев М.М. Электрооборудование прокатных и трубных цехов : учебник для техникумов / М.М. Фотиев. М. : Металлургия, 1995.-256 с.
- 6. Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х Дацковский, И.С. Кузнецов М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.: ил.

УДК 681.51:62-83

# МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ АДКЗ С ШИП ГЕНЕРАЦИЕЙ СИНУСОИД ПО ПЕРВОЙ ГАРМОНИКЕ

## П. Н. Кунинин, М. М. Кучик, А. И. Рыбаков

Сибирский государственный индустриальный университет г. Новокузнецк

Решена задача подавления высших гармоник при управлении асинхронным электродвигателем изменением напряжения. Созданы математические функции первых гармоник с функцией управления

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

амплитудой, которые с помощью ШИМ преобразуются в трехфазное синусоидальное напряжение практически при отсутствии высших гармоник.

Ключевые слова: ШИМ, первая гармоника, синусоидальное напряжение, высшие гармоники, управление амплитудой.

**Введение.** При управлении скоростью, плавным пуском и торможением асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) изменением напряжения полезной является только первая гармоника [1], экономически целесообразно исключение состава высших гармоник. На решение этой задачи и ориентировано содержание данной статьи.

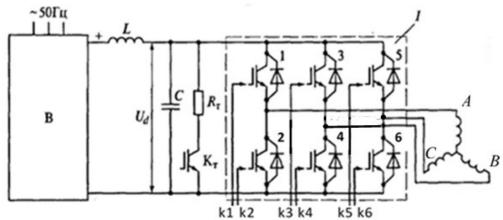


Рисунок 1 – Трёхфазный инвертор

Инвертор транзисторного преобразователя частоты (рисунок 1 из [2]) обеспечит решение задачи управления АДКЗ изменением напряжения, если на входе сформировать синусоидальный сигнал с переменной амплитудой и постоянной частотой.

В работе [3] авторами данной статьи предложено управлять напряжением вырезанием участков синусоиды напряжения не в начале полуволн (рисунок 2,а), как это общепринято, а в конце полуволн (рисунок 2,b). Разложив полученную кривую в ряд Фурье получили функцию первой гармоники (1) амплитуда которой (2) может управляться непосредственно с помощью переменной  $\tau$  без дополнительных сопрягающих устройств. На рисунке 2 вырезаются два участка, общая длина которых равна  $2\tau$ , поэтому в функциях (1) и (2) диапазон изменения  $\tau$  принят от 0 до  $T_{\pi}/2$ .

$$U_{A}(t) = A(\tau) \cdot \sin(\omega t), 0 \le \tau \le T_{\pi}/2 \tag{1}$$

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

$$A(\tau) = \frac{U}{2\pi} \left( 2\pi - \frac{4\pi}{T_{\pi}} \tau \right) = U \left( 1 - \frac{2}{T_{\pi}} \tau \right). \tag{2}$$

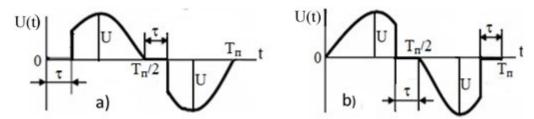


Рисунок 2 – Управление напряжением изменением параметра τ Переменная τ на входе системы управления инвертором (рисунок 1) обеспечивает прямое соединение с выходом системы управления АДКЗ без промежуточных блоков преобразования.

В настоящее время преимущественно применяется линейный закон задания напряжения. Но исследования в источнике [1] показали, что потери уменьшаются, если применять не линейную, а экспоненциальную зависимость. В этом отношении с введением параметра  $\tau$  открываются новые достаточно широкие возможности поиска более эффективных алгоритмов.

В микроконтроллерной системе математическая модель одновременно является и алгоритмом для реализации программы управления исключая интерфейс с объектом.

К уравнению (1) фазы A добавим уравнения второй B и третей C фаз соответственно со сдвигом на углы  $-2\pi/3$  и  $2\pi/3$ , в результате получаем модель питания АДКЗ

$$\begin{cases} U_{A}(t) = A(\tau) \cdot \sin(\omega t), \\ U_{B}(t) = A(\tau)\sin(\omega t - 2\pi/3), \\ U_{C}(t) = A(\tau)\sin(\omega t + 2\pi/3). \end{cases}$$
 (3)

При увеличении  $\tau$  амплитуда  $A(\tau)$  уменьшается и при  $\tau = T_{\Pi}/2$  принимает равное нулю значение, что подтверждает правильность задания интервала  $0 \le \tau \le T_{\Pi}/2$  в (1). Кроме того, первая функция из (3) по значению переменной  $\tau$  формирует сигнал задания в виде синусоиды с управляемой амплитудой.

В [2, 4, 5] инвертор работает как преобразователь частоты с постоянной амплитудой. Задачу перехода на формирование входного синусоидального сигнала с переменной амплитудой и с входным сигналом  $\tau$ , согласованным с выходом системы

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

управления АДКЗ, мы решили. Переходим к анализу особенностей широтно-импульсной модуляции (ШИМ) входных синусоид инвертора с постоянной частотой и переменной амплитудой.

В качестве несущей используются периодические треугольные импульсы высокой частоты, а модулируется входное напряжение инвертора синусоидальной формы. На стороне питания АДКЗ синусоида аппроксимируется прямоугольными импульсами переменной ширины. Прямоугольные импульсы U<sub>m</sub> формируются из постоянного напряжения выпрямителя со средней точкой с помощью коммутации двух транзисторных ключей с обратными диодами. Верхний ключ формирует положительные, а нижний отрицательные импульсы

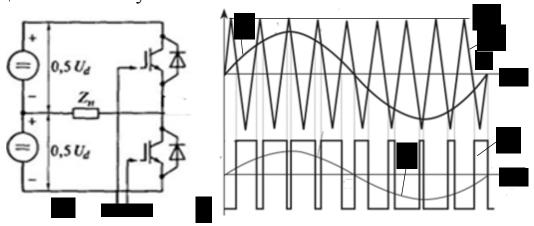


Рисунок 3 – ШИМ преобразование синусоиды

Ширина и знак импульсов определяется разностью  $U_{\rm m} - u_{\rm on}$ . Если разность больше нуля импульс положительный, если меньше, то отрицательный. Время постоянства знака определяет ширину импульса. Если амплитуда опорного напряжения меньше амплитуды синусоиды, TO В середине положительной отрицательной полуволн синусоиды будет излишне широкий импульс. Если амплитуда опорного напряжения больше амплитуды синусоиды, то невозможно получит узкие промежутки между импульсами. В обоих случаях возрастает доля высших гармоник и энергетические показатели существенно ухудшаются. Поэтому

$$U_{\text{off}} = U_{\text{m}},\tag{4}$$

В трехфазном инверторе (рисунок 1) к средним точкам соединения ключей подключены начала фазных обмоток A, B, C,

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

Источником В звезду. питания соединенных служит неуправляемый выпрямитель В, выходное напряжение которого L-C фильтром. Ключ  $K_{T}$ сглаживается c резистором обеспечивают динамическим торможением при снижении скорости двигателя.

Точность аппроксимации синусоидального напряжения В микроконтроллерной системе зависит OT величины шага приращения времени dt в управляющей программе. Точность повышается при уменьшении dt, увеличении количества опорных импульсов период сетевого треугольных 3a напряжения увеличении количества шагов dt для реализации треугольного импульса.

Задаемся кратностью частоты KolUop опорного напряжения  $f_{on}$  к частоте сетевого  $f_{n}$ , которое определяет количество треугольных импульсов за один период синусоиды питающей сети (рисунок 3). Согласно [2, 4, 5] кратность частоты не менее 100 раз

KolUop = 
$$f_{o\pi}/f_{\pi} = T_{\pi}/T_{o\pi} = 100$$
, (5)

откуда следует, что вычисления должны повторяться с шагом  $dt1 = T_{\pi}/KolUop,$ 

при этом для выполнения треугольного импульс выделяется только один шаг dt1. Чтобы обеспечить обработку треугольного импульса и высокую точность воспроизведения ШИМ синусоиды уменьшим шаг dt1 в kratn раз. Тогда шаг повторения вычислений микроконтроллера составит

$$dt = T_{\pi}/(KolUop * kratn), \tag{6}$$

причем для обработки треугольного импульса выделяется время

$$T_i = kratn * dt$$

Согласно рисунку 3 и равенству (4) максимальное значение опорного напряжения  $U_{on} = U_{m}$  достигается за половину длительности треугольного импульса, следовательно за половину шагов вес одного шага равен

$$du_{op} = \frac{2U_m}{T_1} dt.$$

Учитывая (4) для расчета U<sub>оп</sub> получаем соотношение

$$U_{op} = U_{op} + du_{op}.$$

Подставляя  $du_{op}$  получим окончательную функцию для вычисления опорного напряжения

$$U_{op} = U_{op} + \frac{2U_m}{T_1} dt.$$
 (7)

Опорное напряжение двухполярное и ограничено как по максимуму, так и по минимуму в отрицательной области. После достижения максимума опорное напряжение должно уменьшать до минимального, а затем снова возрастать. Решение достигается изменением знака  $du_{op}$  при достижении максимума и минимума

$$if (\mathbf{U_{op}} > U_m)$$
 $\mathbf{du_{op}} = -\mathbf{du_{op}};$  // Меняем знак '+' на '-'
(8)
 $if (\mathbf{U_{op}} < U_m)$ 
 $\mathbf{du_{op}} = -\mathbf{du_{op}};$  // Меняем знак '-'на '+'

Выполнение общего алгоритма начинается с вычисления текущих значений амплитуды  $A(\tau)$  по функции (2), напряжения фаз  $U_a(t)$ ,  $U_b(t)$  и  $U_c(t)$  по функциям (3) и опорное напряжение по функции (8) с учетом алгоритма обработки ограничений (9). Затем вычисляем разности между текущими значениями напряжений фаз и одним общим для фаз опорным напряжением $U_{op}$ :

$$\begin{cases} Razn_A = U_a(t) - Uoп, & \varphi asa a, \\ Razn_B = U_b(t) - Uoп, & \varphi asa b, \\ Razn_C = U_c(t) - Uoп, & \varphi asa c, \end{cases}$$
 (9)

где последние символы в имени Razn\_N указывают фазу, относительно которой определяется разность.

При положительной разности импульс ШИМ положительный, при отрицательной — отрицательный. Проблемной является задача определения одновременно замыкаемых ключей и последовательность замыкания. В [2] приводится таблица с нарушением общепринятого порядка нумерации ключей в нижней группе - вместо нумерации 2, 4, 6, принято 4, 6, 2. В отличие от [2] в источнике [4] используется общепринятая нумерация, но в том и другом случае не приводится теоретическое обоснование.

В этой связи предлагаем простой метод определения сочетания

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

замыкаемых ключей и порядок их выполнения. Нумерацию ключей на рисунке 1 в отличие от нумерации автора работы [2] заменили на общепринятую, упорядоченную по столбцам 1-2, 3-4, 5-6. Использование этого порядка существенно упрощает построение импульсов ШИМ. Ключа 1 и 2 соединены с фазой А АДКЗ, ключи 3 и 4 с фазой В, а ключи 5 и 6 с фазой С. Кроме того учтем, что ключи 1,3,5 проводят ток положительной полярности, а ключи 2,4,6 отрицательной. Учитывая изложенное, примем следующие обозначения 1А и -2A, 3В и -4B, 5С и -6С.

Группировку ключей ПО одновременному выполним в порядке номеров ключей. Начнем с ключа 1А, в соответствии с рисунком 1 из нижней группы с ним могут замыкаться только ключи 4А и -6С, поскольку при замыкании короткое замыкание. ключа произойдет Переходим следующему по нумерации ключу -2A, ему соответствуют ключи 3В и 5В из верхней группы. Следующий по порядку ключ 3. В получаем следующую последовательность результате замыкания ключей:

```
1.(1A,-4B,-6C); 2.(-2A,3B,5C); 3.(3B,-2A,-6C); 4.(-4B,1A,5C); 5.(5C,-2A,-4B); 6.(-6C,1A,3B), (10)
```

причем нечетные ключи соответствуют положительной полярности, а четные отрицательной. Приведенная последовательность замыкания ключей соответствует разностям (9).

Разработанная схема замыкания ключей в соответствии с рисунком 1 обеспечивает прямое чередования фаз. Для перехода к схеме обратного чередования фаз достаточно поменять местами подключение фаз В и С на зажимах АДКЗ. В работе [2], применительно к преобразователю частоты, подобная задача решается более сложным способом. В системе управления инвертора изменяется последовательность замыкания ключей на обратную.

Из (10) следует, что при замыкании ключей к напряжению  $U_d$  подключаются последовательно соединенные обмотки АДКЗ, причем две обмотки в последовательной цепи соединены

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

параллельно, в связи с этим на одной обмотке падает напряжение  $2/3U_d$ , а на параллельно включенных  $1/3U_d$ . В источнике не уделяется внимание одной особенности замыкания ключей. Когда замыкается первая группа (10) на фазе А формируется импульс ШИМ величиной  $2/3U_d$ . Но ключ 1A используется еще на четвертом и шестом шагах в группах 4 и 6 величиной по  $1/3U_d$ . В данной работе добавками к уже имеющемуся импульсу пренебрегают. На наш взгляд добавки необходимо учитывать. Список (10) имеет ту особенность, что у всех групп первые ключи имеют порядковые номера и располагаются по их возрастанию. Это дает возможность группы ключей расположить в двухмерный массив, в котором по строкам располагаются группы ключей с номерами 1, 2, 3, 4, 5, 6, а первые ключи имеют те же номера

Создаем массив добавок так же по возрастающим номерам

Dobawki[6] = 
$$[1A * 2, -2A * 2, 3B * 2, -4B * 2, 5C * 2, -6C * 2].$$

В массивах зашифрована вся необходимая информация по обработке данных. Результат обработки — напряжение, которое следует занести ШИП фазы. Для первых элементов напряжение  $2/3U_d$ , для второго и третьего  $1/3U_d$ . Извлечение данных из массива ведется по строкам, например, извлекаем первый элемент из второй строки: GrKluch[2][1]=-2A, где 2 означает второй ключ, следует напряжение  $2/3U_d$  занести в ШИМ фазы A со знаком минус. Для второго, элемент GrKluch[2][2]=-2A, ключ 2, напряжение  $1/3U_d$  занести в фазу A со знаком минус. В следующем массиве запросом Dobawki[2] для -2A получаем -2A\*2, что означает необходимость внести добавку  $1/3U_d$  умноженную на два. во второй элемент -2A второй строки массива (11).

В математической модели полученные разности подаются

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

непосредственно на управляющие входы моделей транзисторных ключей соответствующих фаз, в реальной системе напряжения ШИМ масштабируются по напряжению портов вывода микроконтроллера и подаются на входы транзисторных ключей, при недостаточном напряжении через согласующие устройства.

создания В работе решена задача модели управления изменением напряжения АДКЗ по первой гармонике практически Создана исключающем высшие гармоники. формирующая первую гармонику, характер изменения амплитуды которой определяется характером изменения входной величины au. гармоника служит модулирующим источником генерации высокочастотной синусоидальной ШИМ для питания АДКЗ.

Создан алгоритм прямого преобразования разности между синусоидальным и треугольным опорным напряжением в прямоугольные импульсы переменной ширины синусоидальной ШИМ при помощи двух простейших массивов с информацией, закодированной в именах простейшей формы. Это достигнуто в том числе и благодаря разработанной авторами упорядоченной системы генерации последовательности замыкания ключей.

Разработана модель, ориентированная на реализацию микроконтроллерной программы управления ДЛЯ управления за исключением интерфейса с объектом управления, согласование который выражается В напряжения портов микроконтроллера с напряжением управления транзисторным Синусоидальность фаз напряжения существенно ключами. энергетические преобразователей повышает показатели изменением электроприводов cуправлением питающего напряжения.

#### Список литературы

1. Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока [Текст] / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. — Мн.: Техноперспектива, 2006. - 363 с.

- 2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст] / Г.Г. Соколовский, учебник для студ. высш. учеб. заведений. -М.: Издательский центр «Академия», 2006.-272 с.
- 3. Кунинин П.Н. Асинхронный электропривод с регулятором напряжения по первой гармонике ряда Фурье [Текст] / П.Н. Кунинин, М.М., Рыбаков А.И., Кучик М.М. Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов, науч. журнал/ Сиб. гос. индустр. ун-т. Под общей ред. В.Н. Фрянова, 2018 № 4, с. 365-370.
- 4. Курбатов П.А. Электрические и электронные аппараты [Текст] / учебник и практикум для академического бакалавриата М.: Издательство Юрайт. 2016. 440 с.
- 5. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст] / Р.Т. Шрейнер. Екатеринбург: 2000/ 654 с.

УДК 004.942:621.313.333

#### АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

#### В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

На основании баланса мощностей асинхронной машины получены расчетное выражение, структурная схема датчика и алгоритм измерения электромагнитного момента асинхронного двигателя, удобный для использования в диапазоне изменения скольжений, соответствующем рабочему участку механической характеристики двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, электромагнитный момент, идентификация, измерение, алгоритм, баланс мощностей, коэффициент мощности.

Необходимость идентификации электромагнитного момента асинхронного двигателя (АД) связана с его широким применением в современном электроприводе, в том числе, для механизмов, для которых требуется прямое управление моментом. Если для двигателя постоянного тока идентификация момента является сравнительно простой задачей по причине линейной зависимости момента от силы тока якоря, то для АД момент нелинейно зависит от токов ротора и статора, что осложняет его идентификацию.

Уравнение механической характеристики АД имеет вид:

$$M = \frac{3U_S^2 R_R^{'}}{\omega_0 s \left[ \left( R_S + \frac{R_R^{'}}{s} \right)^2 + X_K^2 \right]},$$
 (1)

где  $U_S$  — действующее значение напряжения на статоре машины,  $R_R$ ' — приведенное активное сопротивление цепи ротора АД,  $\omega_0$  — скорость вращения магнитного поля в воздушном зазоре (синхронная скорость),  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  — скольжение ( $\omega$  — текущая скорость вращения вала),  $R_S$  — активное сопротивление цепи статора,  $X_\kappa$  — индуктивное сопротивление короткого замыкания АД.

Выражение (1) может быть представлено в виде т.н. формулы Клосса, приближенно описывающей механическую характеристику АД:

$$M = \frac{2M_{\kappa p}}{\frac{S}{S_{\kappa p}} + \frac{S_{\kappa p}}{S}},\tag{2}$$

где  $M_{\kappa p}$  — критическое значение момента АД,  $s_{\kappa p}$  — критическое значение скольжения. В случае  $s < s_{\kappa p}$  (2) описывает рабочий участок механической характеристики АД, который является практически линейным.

Определение момента напрямую по (1-2) затруднено из-за необходимости идентификации индуктивного сопротивления АД и расчета критического значения скольжения машины. Существующие решения можно разделить на две группы:

- 1) Идентификация момента на основе измерения механических координат двигателя скорости вращения вала или углового ускорения. К этой группе можно отнести решения [5, 11]. Недостатком таких способов является необходимость точного измерения механических координат АД, что затруднительно.
- момента Идентификация 2) на основе электрических координат АД [1-4, 6-10, 12, 14]. В основе решений из этой группы лежит измерение токов и напряжений обмоток машины и вычисление момента, исходя из их значений. В рамках данной группы существует два основных подхода. Первый предполагает переход от реальных координат АД к координатам ее двухфазной модели и вычисление момента на основе проекций токов или потокосцеплений двухфазной модели. В частности, такой подход используется в системах векторного управления АД. Его недостатком является необходимость выполнения объемных координатных И **УГЛОВЫХ** преобразований потокосцеплений, либо Холла использования датчиков ДЛЯ непосредственного измерения потокосцеплений.

Второй подход предполагает идентификацию момента на основе баланса мощности двигателя.

Мощность, подводимая к статору двигателя [15], может быть определено как:

$$P_S = 3U_S I_S \cos \varphi_S, \tag{3}$$

где  $U_S$ ,  $I_S$  — действующие значения напряжения и тока в фазе статора,  $\varphi_S$  — фазовый сдвиг между током и напряжением фазы статора.

Электромагнитная мощность, передаваемая обмотками статора ротору через магнитное поле в воздушном зазоре машины, определяется как:

$$P_R = P_S - \Delta P_S = P_S \left( 1 - \frac{\Delta P_S}{P_S} \right) = P_S k_n = 3U_S I_S \cos \varphi_S k_n = M\omega_0, \qquad (4)$$

где  $\Delta P_S$  — потери в статоре,  $k_n = \left(1 - \frac{\Delta P_S}{P_S}\right)$  — коэффициент, учитывающий потери в обмотках и стали статора .

С другой стороны, переданная ротору мощность расходуется на формирование момента машины и на потери в обмотках ротора [16], и справедливо соотношение:

$$P_R = M\omega + M\omega_0 s \Rightarrow M\omega_0 = M\omega + M\omega_0 s, \qquad (5)$$

где M – электромагнитный момент АД.

Из (4) и (5) следует, что момент машины может быть определен по выражению:

$$M = \frac{3U_S I_S \cos \varphi_S k_n}{\omega_0}.$$
(6)

Вычисление электромагнитного момента АД по (6) может быть выполнено путём измерений текущих (мгновенных) значений тока и напряжения статора. Основной задачей в данном случае является определение фазового сдвига  $\varphi_S$ .

При этом выражение (6) справедливо только для участка механической характеристики при  $s < s_{\kappa p}$ , поскольку в области  $s > s_{\kappa p}$  существенно влияние реактивного тока [13]. Следовательно, вычисление момента по (6) целесообразно только в области линейного участка механической характеристики (2).

Определение фазового сдвига и коэффициента мощности  $\cos \varphi_S$  может быть выполнено исходя из представления мгновенных значений тока и напряжения (рисунок 1).

В общем случае кривые тока и напряжения содержат высшие гармоники, поэтому все вычисления производятся по первым гармоникам.

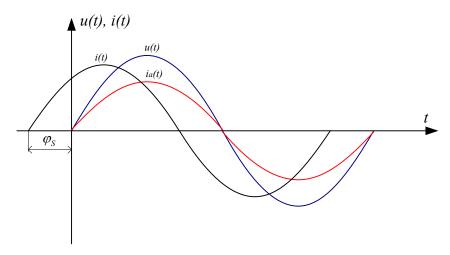


Рисунок 1 – Ток и напряжение статора АД

Первым гармоникам тока и напряжения статора соответствуют следующие выражения:

$$u_{S}(t) = U_{S \max} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

$$i_{S}(t) = I_{S \max} \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \phi_{S}\right),$$
(7)

где  $U_{Smax}$ ,  $I_{Smax}$  — максимальные значения напряжения и тока соответственно, T — период напряжения на статоре.

Для любого момента времени  $t_1$  из (7) следует:

$$\arcsin \frac{u_{St1}}{U_{S\max}} = \frac{2\pi}{T} t_1,$$

$$\arcsin \frac{i_{St1}}{I_{S\max}} = \frac{2\pi}{T} t_1 + \phi_S,$$
(8)

где  $u_{Stl}$ ,  $i_{Stl}$  — значения напряжения и тока в момент времени  $t_l$ . Из (8) следует, что фазовый сдвиг может быть определен как:

$$\phi_S = \arcsin \frac{i_{St1}}{I_{S\max}} - \arcsin \frac{u_{St1}}{U_{S\max}}.$$
 (9)

Следовательно, исходя из (9), коэффициент мощности может быть определен как:

$$\cos\phi_S = \cos\left(\arcsin\frac{i_{St1}}{I_{S\max}} - \arcsin\frac{u_{St1}}{U_{S\max}}\right). \tag{10}$$

где  $\varphi_S$  — фазовый сдвиг между током и напряжением статора,  $U_{Smax}$ ,  $I_{Smax}$  — максимальные значения напряжения и тока соответственно;  $U_{Smax}$  известно;  $I_{Smax}$  определяется по выражению  $I_{Smax}$  —  $\sqrt{3}U_{Smax}$  набо определяется на среднему значение.

$$I_{S\, {
m max}} = rac{\sqrt{3} U_{S\, {
m max}}}{R_{{
m \it Hazp}}}$$
 либо определяется по среднему значению

Обработка сигналов мгновенных значений тока, напряжения и скорости в современных системах происходит в цифровом виде. При этом сигналы представлены не в виде непрерывно изменяющихся величин, а виде дискретных отсчетов (рисунок 2). При этом отсчеты берутся через фиксированный временной интервал, называемый периодом дискретизации, n — номер отсчета.

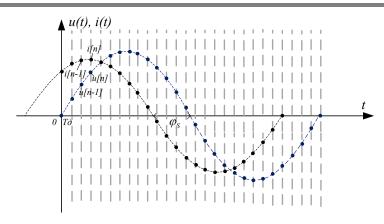


Рисунок 2 – Дискретное представление сигналов тока и напряжения

Величина, обратная  $T_{\partial}$ , называется частотой дискретизации:

$$f_{\partial} = \frac{1}{T_{\partial}}. (11)$$

Для корректной обработки сигналов тока и напряжения необходимо, чтобы измерительная система производила достаточно отсчетов 3a период изменения сигнала ДЛЯ однозначного восстановления. Известно, что заниженная частота дискретизации вызывает искажение сигнала. Определяющим положением при определении частоты дискретизации является теорема Котельникова-Шеннона: аналоговый сигнал с граничной линейной частотой может быть восстановлен однозначно и без потерь при частоте дискретизации, равной или большей удвоенной граничной частоте. Для рассматриваемого случая граничная частота определяется периодом первой гармоники напряжения T:

$$f_{\mathcal{A}} \ge \frac{2}{T}.\tag{12}$$

Применительно к измерительным процессам и цифровой обработке сигналов удобно пользоваться следующим определением: непрерывный сигнал x(t) можно представить в виде интерполяционного ряда:

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta) \sin c \left[ \frac{\pi}{T_{\partial}} (t - k\Delta) \right]; \tag{13}$$

где  $x(k\Delta)$  - значения дискретных отсчетов;  $T\partial$  — период

дискретизации; 
$$t$$
 — время;  $\sin c = \begin{cases} \frac{\sin x}{x}, x \neq 0; \\ 1, x = 0 \end{cases}$  - ненормированный

кардинальный синус, либо 
$$\sin c = \begin{cases} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, x \neq 0; \\ 1, x = 0 \end{cases}$$
 - нормированный

кардинальный синус.

При соблюдении условий теоремы Котельникова, функция x(t) может быть восстановлена из её дискретизации, x[n] = x(nT), согласно интерполяционной формуле Уиттекера — Шеннона:

$$x(t) = \sum_{n = -\infty}^{\infty} x[n] \cdot \sin c \left( \frac{t - nT_{\partial}}{T_{\partial}} \right). \tag{14}$$

Для практических задач дискретизации гармонического сигнала с выраженной первой гармонической составляющей частоты дискретизации, соответствующей граничной частоте по теореме Котельникова, оказывается недостаточно [16]. В данном случае величина периода дискретизации определяется необходимой точностью вычисления фазового сдвига. Если необходима точность в  $\sigma^{\circ}$ , а частота напряжения на статоре равна 50  $\Gamma$ ц, то необходимый период дискретизации определится как:

$$T_{\mathcal{I}} \le \frac{\sigma}{50 \cdot 360}.\tag{15}$$

Так, для точности определения фазового сдвига в  $1^{\circ}$  в соответствии с (15) необходим период дискретизации  $5,56\cdot 10^{-5}$  с, чему соответствует частота дискретизации

$$f_{\mathcal{A}} \ge \frac{1}{T_{\mathcal{A}}} \approx 18000 \, \Gamma u \,. \tag{16}$$

Таким образом, для точности измерения фазового сдвига в 1° необходима частота дискретизации 18 кГц. Если допустить точность в 2°, то необходимая частота дискретизации снижается до 9 кГц. Очевидно, что такое значение частоты и периода дискретизации соответствуют условиям теоремы Котельникова для сигналов основных гармоник тока и напряжения на статоре, имеющих частоту 50 Гц.

Среднее значение тока статора определяется по выражению:

$$I_{Scp} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T/2} I_{S \max} \left( \sin \frac{2\pi}{T} t \right) dt.$$
 (17)

Из (17) следует, что максимальное значение тока может быть определено по выражению:

$$I_{S \max} = \frac{\pi I_{Scp}}{2} \,. \tag{18}$$

Среднее и максимальное значения напряжения на статоре определяются аналогично (17-18).

Объединив выражения (6, 10, 17, 18) составим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T_{\mathcal{A}} \leq \frac{n}{50 \cdot 360}, \\ I_{Scp} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T/2} I_{S \max} \left( \sin \frac{2\pi}{T} t \right) dt, \\ I_{S \max} = \frac{2\pi I_{Scp}}{2}, \\ \cos \phi_{S} = \cos \left( \arcsin \frac{i_{St1}}{I_{S \max}} - \arcsin \frac{u_{St1}}{U_{S \max}} \right), \\ M = \frac{3U_{S} I_{S} \cos \varphi_{S} k_{n}}{\omega_{0}}. \end{cases}$$

$$(19)$$

По уравнениям системы (19) может быть составлена структурная схема датчика момента, приведенная на рисунке 3.

дополнительно Ha рисунке 3 приняты следующие обозначения: Ф1 – фильтр первой (основной) гармоники; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; БРН – блок расчета напряжения (в соответствии с (17)); БРТ – блок расчета тока (по (17));  $k_U$ ,  $k_I$  – масштабные коэффициенты; БУИ – блок учета инерционностей суммарная времени,  $(T_{\mathcal{U}}$ постоянная учесть все инерционности машины, позволяющая коэффициент градуировки датчика).

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

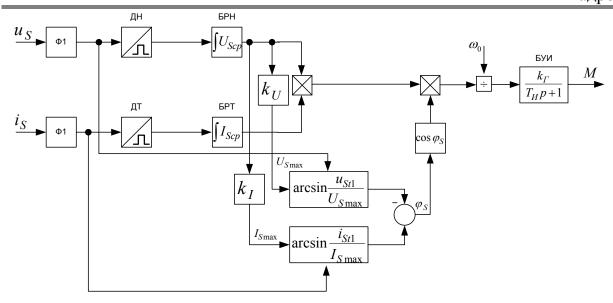


Рисунок 3 – Структурная схема дискретного датчика момента

Таким образом, методика измерения момента АД может быть сформулирована следующим образом:

- 1) Выбор метода идентификации.
- 2) Составление уравнений для вычисления промежуточных величин.
- 3) Выделение базовых измеряемых величин.
- 4) Вычисление величин, производных от базовых.
- 5) Определение дискретных значений.
- 6) Переход от уравнений к структурной схеме и блок-схеме алгоритма.

Таким образом, получены выражения и вычислительная структура, разработан алгоритм измерения момента АД, а также разработана методика измерения момента двигателя.

#### Библиографический список

- 1. Method of Measuring Torque of an AC Motor: πατ. 4616719 CIIIA, G01L 3/00
- 324/107; 364/483 / Dennis H. Braun ; заявитель и патентообладатель Eaton Corporation. заявл. Oct. 7, 1986.

- СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров
- 2. Устройство для измерения электромагнитного момента асинхронного двигателя : описание изобретения к авторскому свидетельству SU 1 631 322 A1 / Кривицкий М. Я., Поносов С. В., Рот А. В. ; заявитель и патентообладатель Пермский политехнический институт. № SU 1 631 322 A1; заявл. 09.01.89 ; опубл. 28.02.91, Бюл. № 8. 4 с.
- 3. Устройство для измерения электромагнитного момента асинхронного двигателя : описание изобретения к авторскому свидетельству SU 1 645 856 A1 / Кривицкий М. Я., Поносов С. В., Рот А. В. ; заявитель и патентообладатель Пермский политехнический институт. № SU 1 645 856 A1 ; заявл. 09.01.89 ; опубл. 30.04.91, Бюл. № 16. 4 с.
- 4. Устройство для определения электромагнитного момента асинхронного двигателя : описание изобретения к авторскому свидетельству SU 1 770 785 A1 / Соседка В. Л., Пружанский Д. И., Коломойцева Л. Ф., Мокрый А. И. ; заявитель и патентообладатель Днепропетровский Горный университет им. Артема. № SU 1 770 785 A1 ; заявл. 21.03.90 ; опубл. 23.10.92, Бюл. № 39. 5 с.
- 5. Buinac, R. Determination of torque-speed characteristics of induction motor in electric machinery education / R. Buinac, V. Tomljenovic // Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO), 2013 36th International Convention on. 2013. Pp. 765-769.
- 6. Beatie, W. C. Torque measurement in induction motors / W. C. Beatie // Measurement and Control. 1973. Pp. 263-266.
- 7. Rahman, A. Electromagnetic Contactless Torque Transducer: Torque Measurement and Shaft Impediment Approach / A. Rahman, A. K. M. Mohiuddin, B. M. Daud // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2019. Vol. 7. Iss 6S. Pp. 298-303.
- 8. Irie, H. A Simple Method for Detecting Torque of an Induction Motor with a Synchronous Rectifier Circuit / H. Irie, T. Katayama // Electrical Engineering in Japan. 1999. Vol. 126. No 3. Pp. 83-90.
- 9. Silva, W. L. A Method for Measuring Torque of Squirrel-Cage Induction Motors Without Any Mechanical Sensor / W. L. Silva, A. M.

- N. Lima, A. Oliveira // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2015. Vol. 4. Iss. 5. Pp. 1223 1231.
- 10. Ташлицкий, М. М. Разработка способов экспериментального определения параметров и механических характеристик асинхронных двигателей : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы / Ташлицкий, Максим Михайлович. М. : Московский энергетический институт, 2005. 20 с.
- 11. Бычков, Е. В. Измерение крутящего момента на валу асинхронного электродвигателя / Е. В. Бычков, И. П. Христич // Нефть и газ. 1998. N = 3. C. 107 = 109.
- 13. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
- 14. Островлянчик В.Ю., Поползин И.Ю. Модель асинхронного двигателя для бездатчиковых информационно-управляющих систем автоматизированного электропривода / В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин // Вестник КузГТУ. 2016. N21(113). с. 110-119.
- 15. Костенко, М.П. Электрические машины. Часть 2 / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Л.: Энергия, 1973.-648 с.
- 16. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. М. : Энергия, 1974. 568 с.

УДК 004.942:621.313.333

### СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

#### В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

В статье описывается система автоматического регулирования скорости электропривода подъемной установки, построенной на основе

асинхронного двигателя с двойным питанием и комбинированным управлением добавочным напряжением на роторе.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, машина двойного питания, шахтная подъемная установка, автоматическое регулирование скорости, частотная коррекция.

Разработанный в [1] алгоритм управления ДЛЯ своего осуществления может быть реализован в системе управления электроприводом на основе машины двойного питания (МДП). Как [2],при введении частотной показано коррекции составляющая момента добавки синхронная играет роль асинхронной, повышающей жесткость механической характеристики. При этом канал частоты добавочного напряжения на роторе компенсирует статическую ошибку. Частота изменяется в малых пределах, что обеспечивает линейность суммирования собственной ЭДС ротора и добавочного напряжения. Большинство структурных схем машины при работе (УПН) преобразователя напряжения [2] управляемого И управляемого преобразователя тока (УПТ) [3] является общим, а, следовательно, регуляторы скорости и момента могут быть реализованы как одно устройство с изменяемыми в зависимости от режима работы параметрами.

Формирование амплитуды напряжения на выходе УПН, как показано в [4], осуществляется в соответствии с выражением:

$$U_R = \frac{k_{\Pi}}{T_{\Pi} p + 1} U_{3U}, \tag{1}$$

где  $U_{3U}$  – напряжение задания амплитуды;  $U_R$  – заданная амплитуда добавочного напряжения на роторе.

Изменение частоты на выходе УПН пропорционально напряжению задания:

$$\Delta \omega_{\kappa} = U_{3\omega} k_{\omega}, \tag{2}$$

где  $U_{3\omega}$  – напряжение задания частоты;

 $k_{\omega}$  - коэффициент пропорциональности.

В этом случае частота  $\omega_R$  определится как:

$$\omega_R = \omega + \Delta \omega_K. \tag{3}$$

В соответствии со схемой, приведенной в [2]:

$$\Delta \omega = \pm \Delta \omega_K - \omega + \omega_0. \tag{4}$$

Объединив выражения (1-4), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} U_{R} = \frac{k_{\Pi}}{T_{\Pi} p + 1} U_{3U}, \\ \Delta \omega_{\kappa} = U_{3\omega} k_{\omega}, \\ \omega_{R} = \omega + \Delta \omega_{K} \\ \Delta \omega = \pm \Delta \omega_{K} - \omega + \omega_{0}, \\ u_{R}(t) = U_{R} \sin(\omega_{R} t). \end{cases}$$

$$(5)$$

Системе уравнений (5) может быть поставлена в соответствие структурная схема УПН, приведенная на рисунке 1.

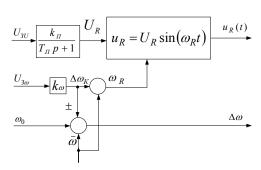


Рисунок 1 – Структурная схема УПН

При работе МДП в электроприводе подъемной установки следует управлять не только скоростью машины, но и ее моментом. Однако прямая идентификация момента машины трудна в реализации. Момент может быть рассчитан на основании измеренного значения активной составляющей тока. В [5] показано, что момент и ток ротора связаны соотношением:

$$M = \frac{3}{2} L_{\mu} i_{Ri} i_S, \tag{6}$$

где  $i_S$  – ток статора машины;  $i_{Ri}$  – активная составляющая тока ротора.

С учетом того, что применяемая для описания МДП система координат связана с вектором тока статора, а добавочное напряжение на роторе сдвинуто относительно напряжения на статоре на угол  $\delta$ ,  $i_{Ri}$  может быть определен как:

$$i_{Ri} = i_R \cos(\delta - \varphi_S + \varphi_R) = i_R \cos\left(\arctan\frac{S}{S_{KPe}} - \arctan\left(\frac{X_S}{R_S}\right) + \arctan\left(\frac{X_R}{SR_R}\right)\right),$$
(7)

где  $i_R$  — ток ротора;  $X_S$ ,  $X_R$  — реактивные сопротивления статора и ротора соответственно;  $R_S$ ,  $R_R$  — активные сопротивления статора и ротора соответственно.

Значение тока статора, входящее в (7), может быть измерено непосредственно или рассчитано через значение напряжения на статоре  $u_S$ :

$$i_{S} = \frac{u_{S}}{\sqrt{R_{S}^{2} + X_{S}^{2}}}.$$
 (8)

(9)

С учетом (7) и (8) выражение (6) может быть записано как:

$$M = f(i_R) = \frac{3}{2} L_{\mu} \frac{u_S i_R \cos \left[ arctg \frac{s}{s_{KPe}} - arctg \left( \frac{X_S}{R_S} \right) + arctg \left( \frac{X_R}{sR_R} \right) \right]}{\sqrt{R_S^2 + X_S^2}}.$$

Вычисление момента в соответствии с выражением (9) осуществляется с помощью нелинейного функционального блока, структура которого приведена на рисунке 2.

Рисунок 2 – Структура функционального блока вычисления момента

Помимо формирования амплитуды и частоты добавочного УПН должен осуществлять коррекцию напряжения, добавочного напряжения в функции скорости для повышения жесткости механических характеристик привода и увеличения машины. Для необходимо критического момента ЭТОГО фазу добавочного напряжения на устанавливать роторе соответствии с условием, полученным в [6]. Для реализации коррекции фазы необходимо вычислять текущее скольжение машины. При этом скорректированная фаза является внутренним

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

параметром УПН, влияющим только на формирование заданного добавочного напряжения.

обосновано [2] было введение коррекции частоты напряжения для получения большого диапазона добавочного скорости регулирования c сохранением перегрузочной способности. Введение частотной коррекции предполагает изменение способа формирования электромагнитного момента, по причине системе управления необходимо этой В который учитывает особенности регулятора момента, формирования момента машины в различных режимах.

Как следует из исследований, проведенных авторами ранее, а также структурной схемы машины, в асинхронном режиме МДП совместно с преобразователем представляют собой колебательное звено. Составим структурную схему контура момента в асинхронном режиме (рисунок 3).

Поскольку ШПУ имеют значительные инерционности, то обычно выполняется условие  $T_M > 4T_R > 20T_H$ , и при расчете контура момента можно пренебречь внутренней противо-ЭДС машины.

Для синтеза регуляторов скорости и тока ротора (момента) МДП в разрабатываемой системе управления используется принцип структурно-параметрической оптимизации с настройками контуров, соответствующими техническому оптимуму, поскольку полученная эквивалентная модель машины позволяет выполнить такой синтез без дополнительных преобразований.

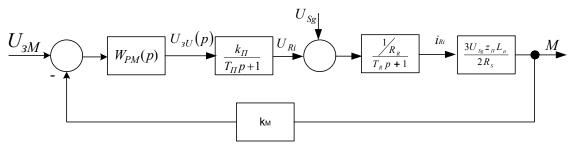


Рисунок 3 — Структурная схема формирования асинхронной составляющей момента ( $k_M$  — коэффициент обратной связи по моменту;  $U_{3M}$  — напряжение задания момента;  $U_{3U}(p)$  — напряжение задания амплитуды добавочного напряжения на роторе)

Для показанной на рисунке 3 схемы с учетом описанной выше связи тока ротора и момента передаточная функция регулятора тока для достижения в контуре технического оптимума определится как:

$$W_{PT}(p) = \frac{U_{3U}(p)}{U_{3M}(p)} = \frac{2R_S R_R (T_R p + 1)}{6U_S z_\Pi L_\mu k_\Pi k_M p}.$$
 (10)

Как следует из [2], при введении частотной коррекции синхронная составляющая момента формируется в МДП таким образом, что канал частоты выполняет функцию ПИ-регулятора для канала амплитуды, внося в асинхронную составляющую момента добавку, устраняющую статическую ошибку по нагрузке увеличивающую жесткость механической значительно Сочетание ПИмашины. ЭТОГО режима характеристики (11)регулированием момента ПО закону дополнительно увеличивает жесткость механической характеристики машины.

При подключении ротора АД ФР к УПТ происходит коммутация в цепи ротора — отключается УПН и подключается УПТ, регулируемой выходной величиной которого является активная составляющая тока ротора. При этом регулирование активной составляющей тока ротора (момента) осуществляется изменением коэффициента в прямом канале управления, а сам УПТ имеет интегрирующие свойства. Для описываемых условий целесообразно иметь П-регулятор момента, работающий по закону:

$$U_{3i} = k_M U_{3M} \,, \tag{11}$$

где  $U_{3i}$  — напряжение задания тока УПТ;  $k_M$  — коэффициент регулятора момента.

Объединив выражения (10) и (11) с условиями переключения между режимами [1], получим математическое описание состояний регулятора момента:

$$\begin{cases} U_{3U} = U_{3M} \frac{2R_S R_R (T_R p + 1)}{6U_S z_\Pi L_\mu k_\Pi k_M p}, 0, 1\omega_0 < \omega \le \omega_0; \\ U_{3i} = k_M U_{3M}, 0_0 \le \omega \le 0, 1\omega_0. \end{cases}$$
(12)

Структура системы автоматического регулирования скорости (СРАС) МДП с учетом всех режимов ее работы, структур УПН и УПТ и регулятора момента, приведена на рисунке 4.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

Ha рисунке введены следующие дополнительные обозначения:  $k_{\omega}$  – коэффициент обратной связи по скорости машины;  $U_{\omega}$  – напряжение, пропорциональное скорости машины; стрелка с надписью «СЛУ» В элементах K означает, Kкоммутация осуществляется ПОД управлением системы логического управления.

Исходя из динамических свойств машины, а также структуры контура скорости, приведенной на рисунке 4, можно прийти к целесообразно использовать пропорциональный что поскольку выполнении регулятор скорости, при условия максимизации момента по фазе [6] в асинхронном режиме приемлемую механические характеристики машины имеют жесткость, а при введении частотной коррекции синхронная момента формирует требуемую составляющая добавку обеспечения жесткости характеристик. При подключении машины к УПТ процессы принципиально не отличаются от асинхронного режима. Кроме того, в контуре скорости машины наибольшей постоянной времени является механическая, полная компенсация которой нецелесообразна.

В асинхронном режиме и при подключении к ротору машины УПТ динамические свойства машины не отличаются, поэтому целесообразно настроить регулятор скорости как П-регулятор:

$$W_{PC} = k_{PC} = \frac{Jk_M}{12T_\Pi k_\omega}. (13)$$

введении частотной коррекции, При следует как соображений, приведенных при синтезе регулятора момента, рабочий участок механической характеристики машины при синхронной составляющей момента введении ПО приближается к естественной характеристике. По этой причине регулятор скорости при введении частотной коррекции задает образом, математическое Таким величину  $\Delta\omega$  . регулятора скорости в этом случае также соответствует (13).

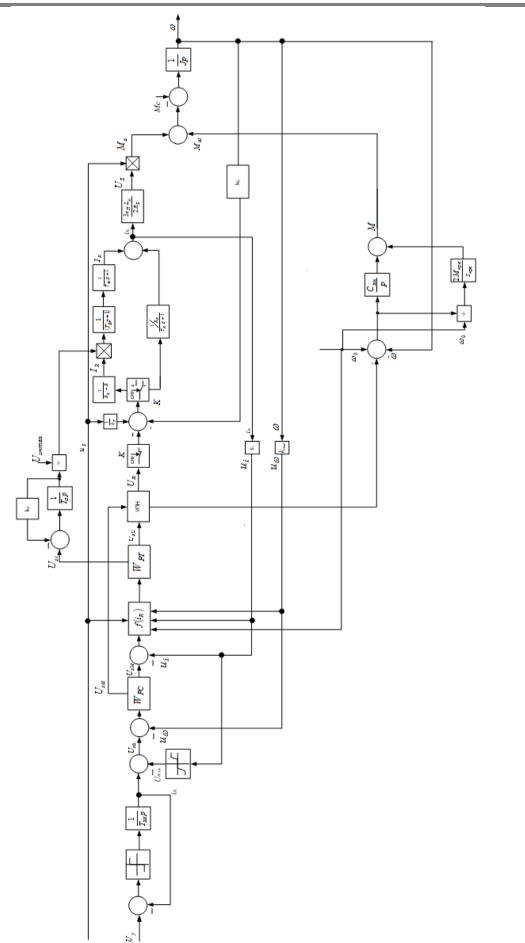


Рисунок 4 – Структурная схема САРС

Для реализации требуемой диаграммы движения привода следует использовать задающее устройство в виде задатчика интенсивности (ЗИ), также показанного на рисунке 4. В схеме задатчика интенсивности предусмотрено ограничение тока ротора машины, реализуемого нелинейным звеном, которое реализует режим токовой отсечки.

обеспечения Таким работы образом, ДЛЯ машины и реализации алгоритма работы СЛУ, сочетанием режимов [1],CAPC обеспечивать В должна корректирующей синхронной составляющей момента, коррекцию фазового сдвига добавочного напряжения на роторе при изменении скорости, а также прямое управления активной составляющей тока ротора.

#### Библиографический список

- 1. Ostrovlyanchik, V.Yu. Operation algorithm of the hoist electric drive based on a doubly-fed machine with combined control / V.Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin, V. A. Kubarev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2018 . -Vol. 206. Р. 1–9 (012040).DOI: 10.1088/1755-1315/206/1/012040.Ostrovlyanchik, V. Y. Equivalent structure of a double-fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric drive systems of mine winders / V. Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 377. [012041, 9 p.] – DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012041.
- 2. Островлянчик, В. Ю., Поползин И. Ю. Эквивалентная структура асинхронного двигателя с двойным питанием с изменением частоты добавочного напряжения для систем электропривода шахтных подъемных установок / В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : научный журнал. 2019. № 5. С. 302–307..

- 3. Управляемый преобразователь тока для электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания / В.Ю. Островлянчик, И.Ю. Поползин, Д.А. Маршев, А.В. Толстых, А.В. Дроздова // Горное оборудование и электромеханика. 2019. №1. С. 40–46.
- 4. Терехов, В.М. Элементы автоматизированного электропривода / В. М. Терехов. М. : Энергоатомиздат, 1987. 224 с.
- 5. Ostrovlyanchik, V.Yu Equivalent model of a dually–fed machine for electric drive control systems / V.Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 354.. P. 1–7 (012017). DOI: 10.1088/1757–899X/354/1/012017.
- Ostrovlyanchik, V.Yu.Mechanical characteristics of a double–fed machine in asynchronous mode and prospects of its application in the electric drive of mining machines / V.Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin, V. A. Kubarev, D. A. Marshev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 84. P. 1–9 (012030). DOI: 10.1088/1755–1315/84/1/012030.

УДК 004.942:621.313.333

СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВОЙНЫМ ПИТАНИЕМ

#### В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

В статье предлагается способ увеличения жесткости механических характеристик машины двойного питания и диапазона регулирования ее скорости за счет изменения частоты добавочного напряжения на роторе машины. Показано, что диапазон регулирования скорости в таком случае может быть расширен до 30-40:1.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

Ключевые слова: асинхронный двигатель, машина двойного питания, жесткость механических характеристик, диапазон регулирования, частотная коррекция.

По состоянию на 2020 год, большинство шахтных подъемных оснащены электроприводом постоянного установок «управляемый преобразователь построенным системе ПО постоянного тока» или «генератор – двигатель», двигатель либо электроприводом, асинхронным синхронным электроприводом с фазным ротором и роторной станцией (АД ФР). Применение электроприводов на основе АД ФР с роторной станцией обусловлено сохранением в такой схеме перегрузочной способности двигателя на всем диапазоне регулирования скорости. В то же время, такие электроприводы имеют низкий КПД, а регулирование скорости в них осуществляется ступенчатым изменением сопротивления роторной станции, что возникновению динамических нагрузок в канатах, рывкам ударам, а также приводит к потерям энергии.

Одним из вариантов модернизации таких приводов является включение асинхронного двигателя с фазным ротором по схеме машины двойного питания (МДП).

Добавочное напряжение на роторе МДП  $U_R$  является переменным и может быть представлено в виде:

$$U_R = U_{R \max} \sin(\omega_R t + \delta), \tag{1}$$

где  $U_{Rmax}$  — амплитуда добавочного напряжения,  $\omega_R$  — частота добавочного напряжения,  $\delta$  — фазовый сдвиг добавочного напряжения.

При изменении частоты добавочного напряжения на роторе на величину  $\Delta \omega_{_{9}}$  выражение (1) примет вид:

$$U_R = U_{R \max} \sin \left[ \left( \omega_R + \Delta \omega \right) t + \delta \right]. \tag{2}$$

Из (2) следует, что изменение частоты добавочного напряжения ротора на величину  $\Delta \omega$  приводит к изменению аргумента функции напряжения. Реализация добавочного напряжения на роторе связана с алгебраическим суммированием собственной ЭДС ротора и добавочного напряжения. Линейная

операция суммирования возможна при равенстве аргументов. В противном случае необходимо рассматривать нелинейные функции и анализ и синтез систем управления значительно усложняются. Для возможности анализа и синтеза систем с помощью аппарата линейной теории управления необходимо произвести линеаризацию; в данном случае линеаризация возможна, если  $\Delta \omega$  мало и выполняется условие:

$$\sin(\Delta\omega) \approx \Delta\omega. \tag{3}$$

В [1] показано, что динамические свойства МДП в синхронном режиме (при соблюдении условия  $\omega_0 - \omega_R = const$ ) аналогичны свойствам синхронного двигателя. Воспользуемся выражением для механической характеристики синхронного двигателя:

$$M = \left(\frac{C_{_{9,M}}}{p} + \beta\right) (\omega_0 - \omega), \tag{4}$$

где  $\omega_0$  — скорость идеального холостого хода машины;  $\omega$  — скорость вращения ротора машины;  $C_{_{9M}}$  — коэффициент электромагнитной связи двигателя;  $\beta = \frac{2M_{KPe}}{\omega_0 s_{KPe}}$  — жесткость рабочего участка механической характеристики машины в асинхронном режиме;  $M_{KPe}$ ,  $s_{KPe}$  — критические момент и скольжение машины на естественной механической характеристике.

Как видно из (4), в этом случае момент машины обусловлен упругой электромагнитной связью с коэффициентом  $C_{_{9M}}$  и демпфирующими свойствами обмотки ротора.

Объединив выражение (4) с основным уравнением движения электропривода, получим:

$$\begin{cases}
M(p) = \left(\frac{C_{\mathfrak{IM}}}{p} + \beta\right)(\omega_0 - \omega), \\
\omega(p) = \frac{M - M_C}{Jp},
\end{cases} (5)$$

где  $M_{\it C}$  — статический момент нагрузки;  $\it J$  — суммарный приведенный к ротору момент инерции привода.

Системе уравнений (5) может быть поставлена в соответствие структурная схема, приведенная на рисунке 1.

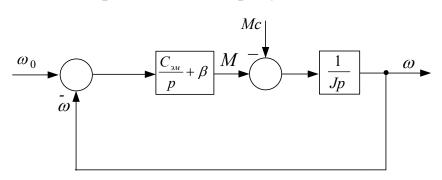


Рисунок 1 — Линеаризованная структурная схема синхронного двигателя в окрестности установившегося режима

Структурная схема, приведенная на рисунке 1 соответствует синхронному двигателю. Для МДП в соответствии с [2, 3] реализация характеристики, аналогичной характеристике синхронного двигателя, возможна, если обеспечить для цепи ротора соблюдение условия  $\omega_{0_9} - \omega_R = const$ , т.е. подать на вход схемы, показанной на рисунке 1, разность  $\omega_{0_9} - \omega_R$ , где  $\omega_R$  – требуемая частота напряжения на роторе.

В этом случае обеспечивается синхронный режим работы МДП, т.е. механическая характеристика МДП является абсолютно жесткой, а на входе реализуется условие:

$$(\omega_{09} - \omega_R) - (\omega_0 - \omega) = \Delta\omega. \tag{6}$$

В общем случае разность  $\omega_{09} - \omega_R$  следует задавать, исходя из условий технической реализации. При реализации семейств характеристик в диапазоне изменения скорости  $0 \le \omega \le \omega_0$  можно считать, что выполняется условие  $\omega_R = \omega \pm \Delta \omega_{\kappa}$ , и частота добавочного напряжения на роторе для формирования (6) изменяется на величину  $\Delta \omega_K$ . В этом случае (6) примет вид:

$$(\omega_{0,2} - \omega) \pm \Delta \omega_{\kappa} - (\omega_0 - \omega) = \Delta \omega. \tag{7}$$

Схема, приведенная на рисунке 1, с учетом (7) примет вид, показанный на рисунке 2. Она описывает свойства МДП при малых приращениях  $\Delta \omega$ .

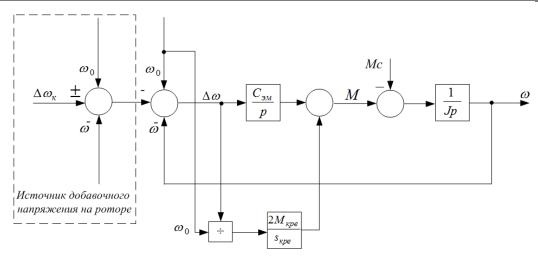


Рисунок 2— Структурная схема МДП при изменении частоты добавочного напряжения на роторе

Объединив уравнения из [4] с уравнениями (5) и (6), получим систему уравнений, описывающих МДП при изменении частоты, амплитуды и фазы добавочного напряжения на роторе:

$$\begin{cases}
(\omega_{09} - \omega) \pm \Delta \omega_{\kappa} - (\omega_{0} - \omega) = \Delta \omega, \\
M = \left(\frac{C_{9M}}{p} + \beta\right) (\omega_{0} - \omega), \\
E_{R} = -k_{E}\omega + u_{S}, \\
\Delta u_{R} = u_{R} + E_{R}, \\
i_{Ra} = \Delta u_{R} \cdot \frac{1}{R_{R}} \frac{1}{T_{R}p + 1}, \\
M_{a} = \frac{3z_{\Pi}L_{\mu}}{2R_{S}} i_{Ra}u_{S}, \\
M_{\Sigma} = M_{a} + M, \\
\omega = \frac{M - M_{C}}{Jp},
\end{cases} (8)$$

где  $M_a$  — асинхронная составляющая момента МДП;  $M_{\omega}$ — синхронная составляющая момента МДП.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

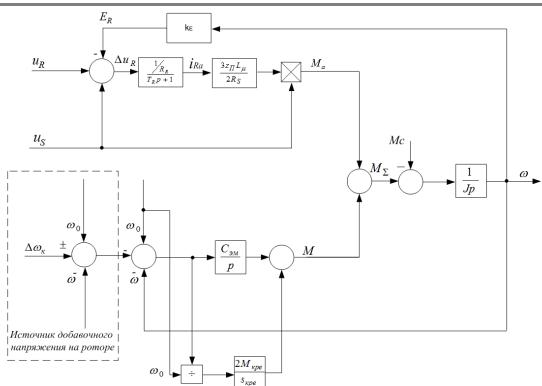


Рисунок 3 – Эквивалентная структура асинхронного двигателя с двойным питанием с изменением частоты добавочного напряжения

Системе уравнений (9) может быть поставлена в соответствие эквивалентная структура асинхронного двигателя c двойным изменением частоты добавочного напряжения, питанием приведенная на рисунке 3. Эта схема позволяет описать все возможные режимы работы МДП. При  $u_{Ri} = 0$  и  $\Delta \omega = 0$  схема фазным асинхронный двигатель описывает  $\mathbf{c}$ ротором источника добавочного напряжения на роторе; при  $u_{Ri} \neq 0$  и  $\Delta \omega = 0$ схема описывает асинхронный режим работы МДП; при  $u_{R_i} \neq 0$  и  $\Delta\omega\neq0$  схема описывает МДП при изменении частоты добавочного Статические напряжения. характеристики, соответствующие полученной эквивалентной схеме для МДП на основе модельного двигателя MTF-111H6, приведены на рисунке 4.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

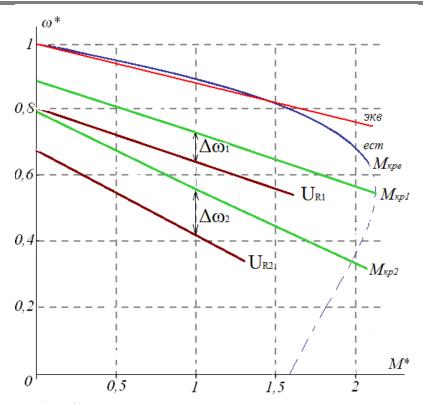


Рисунок 4 — Статические характеристики МДП;  $U_{R2} > U_{RI}$ ;  $\Delta \omega_{R2} < \Delta \omega_{RI}$ 

По характеристикам видно, что регулирование амплитуды добавочного напряжения асинхронном режиме, ведет к рабочего уменьшению жесткости участка механических При введении частотной коррекции характеристик. жесткость механических характеристик критический И момент увеличиваются; ЭТОМ при жесткость зависит величины частотной добавки.

Введение частотной коррекции момента увеличивает жесткость механической характеристики МДП. Для оценки этого влияния необходимо получить выражение для механической характеристики машины в этом случае. Для этого необходимо исследовать статический режим работы схемы, приведенной на рисунке 3 при условии  $\Delta\omega_3\neq0$ . Уравнение механической характеристики [2] в этом случае примет вид:

$$M = \frac{2M_{KPe}}{s_{KPe}/s_{\Delta\omega} + s_{\Delta\omega}/s_{KPe}} \left[ 1 - \frac{U_R^*}{s_{\Delta\omega}} \left( \cos\delta + \frac{s_{\Delta\omega}}{s_{KPe}} \sin\delta \right) \right], \tag{9}$$

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

где 
$$s_{\Delta\omega} = \frac{\omega_{0} - (\omega_9 \pm \Delta\omega_9)}{\omega_{0}}$$
.

Найдя производную (9) по  $\Delta \omega_9$  и приравняв ее к 0, получим критические значения  $\Delta \omega_3$ :

$$\Delta\omega_{_{3K}} = \frac{\begin{cases} s_{KPe}(\omega - \omega_0) + U_R^* [s_{KPe}\omega_0 \cos\delta - \sin\delta(\omega + \omega_0)] \pm \\ \pm \sqrt{s_{KPe}^4 \omega_0^2 + U_R^{*2} s_{KPe}^2 \omega_0^2 - 2s_{KPe}^2 U_R^* \omega_0^2 \sin\delta} \end{cases}}{s_{KPe} - U_R^* \sin\delta}.$$
 (10)

Подставив (10) в (9), получим выражение для критического момента машины при частотной коррекции:

$$M_{\Delta\omega} = \pm \frac{M_{KPe} \left( U_R^* \omega_0 s_{KPe} \cos \delta + \sqrt{\omega_0^2 s_{KPe}^2 \left( U_R^* + s_{KPe}^2 - 2U_R^* s_{KPe} \sin \delta \right)} \right)}{\omega_0^2 s_{KPe}}.$$
(11)

Таким образом, выполнение условий (8) и (10) позволяет увеличивать диапазон регулирования скорости машины.

Уравнение линейного участка механической характеристики машины может быть записано в виде:

$$\omega = \omega_0 - \beta M, \tag{12}$$

где  $\beta$  – жесткость рабочего участка характеристики.

С учетом (6) и (7) (12) может быть записано как:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega - \beta M, \tag{13}$$

Выражение для жесткости с учетом изменения частоты  $\Delta \omega$  может быть записано как:

$$\beta = \frac{M}{\omega_0 s + \Delta \omega},\tag{14}$$

где 
$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$
 - скольжение.

Задачей изменения частоты добавочного напряжения на роторе является увеличение  $\beta$  до жесткости, не менее жесткости естественной механической характеристики. Жесткость естественной механической характеристики может быть найдена как:

$$\beta_e = \frac{M_{Kpe}}{2\omega_0 s_{KPe}}. (15)$$

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

Для того, чтобы выполнялось условие  $\beta = \beta_e$ , величина изменения добавочного напряжения на роторе должна быть равна:

$$\Delta \omega = \frac{M_{\scriptscriptstyle H} s_{KPe} \omega_0 - 0.5(\omega_0 - \omega) M_{KPe}}{2M_{KPe}}.$$
 (16)

По выражению (16) может быть оценен предельный диапазон частоты изменением ΜДП регулирования c добавочного напряжение на роторе с сохранением жесткости рабочих участков механической характеристики равной естественной. Максимальная скорость, при которой  $\Delta \omega$  не превышает определенного в [2] для модельного двигателя MTF-111H6,  $0.094\omega_{0}$ предела составляет 5,2 рад/с (0,049 $\omega_0$ ); при этом диапазон регулирования скорости составляет 20,2:1. Если допустить некоторое уменьшение жесткости механической характеристики МДП в диапазоне малых скоростей ниже жесткости естественной характеристики, регулирования может быть расширен ДО 30-34:1. диапазон рабочий участок естественной Поскольку механической характеристики приводных двигателей шахтного подъема имеет большую жесткость, в отличие от модельной машины, то диапазон может быть оценен как 30:1-40:1.

По результатам работы можно сделать следующие выводы. Режим работы МДП с коррекцией частоты позволяет достичь диапазона регулирования скорости до 30:1-40:1 с сохранением способности всём перегрузочной машины на диапазоне регулирования. При ЭТОМ В режиме синхронная указанном составляющая момента является корректирующей, обеспечивающей высокую жесткость механических характеристик

#### Библиографический список

- 1. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
- 2. Ostrovlyanchik, V. Y. Equivalent structure of a double-fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric drive systems of mine winders / V. Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin // IOP Conference Series: Earth

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных калров

and Environmental Science. – 2019. – Vol. 377. [012041, 9 p.] – DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012041.

- 3. Ostrovlyanchik, V. Y. Algorithmic structure of control system of mine winder electric drive with a doubly–fed motor / V. Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 377. [012042, 8 p.]. DOI: 10.1088/1755–1315/377/1/012042.
- 4. Ostrovlyanchik, V.Yu. Mechanical characteristics of the doubly-fed machine and its use in the hoist electric drive / V.Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin, D. A. Marshev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 206. P. 1–8 (012028). DOI: 10.1088/1755–1315/206/1/012028.

УДК 004.942:621.313.333

#### АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

#### В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин, Д. А. Маршев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Ha основании структурной схемы машины двойного питания получены расчетное выражение, структурная схема датчика и алгоритм измерения электромагнитного момента асинхронного двигателя с фазным использования ротором, удобные ДЛЯ В системах управления электроприводом.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, электромагнитный момент, идентификация, измерение, алгоритм, машина двойного питания.

В настоящее время наиболее распространенным типом электропривода шахтных и рудничных подъемных машин (ПМ), имеющих мощность до 1000 кВт, является асинхронный. Большинство существующих электроприводов подъемных установок построено по схеме «асинхронный двигатель с фазным

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных калров

ротором – роторная резисторная станция» (АД  $\Phi$ P – PC), в котором скорость регулируется изменением активного сопротивления ротора. Это обусловлено большим пусковым моментом приводов такого типа и их технической простотой [1].

недостатки, Несмотря на некоторые электроприводы, АД ФР – РС, являются построенные по схеме самыми для привода ПМ. Причина распространенными ЭТОГО простота сравнительная таких приводов, также удовлетворительные динамические характеристики. В таких ЭП может быть измерен непосредственно, роторный ток существенно упрощают задачу определения момента двигателя.

Необходимость идентификации электромагнитного момента АД ФР связана с его широким применением в современном электроприводе, в том числе, для механизмов, для которых требуется прямое управление моментом. Если для двигателя постоянного тока идентификация момента является сравнительно простой задачей по причине линейной зависимости момента от силы тока якоря, то для АД момент нелинейно зависит от токов ротора и статора, что осложняет его идентификацию.

В [2] приведено выражение (7), определяющее электромеханическую характеристику асинхронного двигателя:

$$M = \frac{3U_{S}^{2}R_{R}^{'}}{\omega_{0}s\left[\left(R_{S} + \frac{R_{R}^{'}}{s}\right)^{2} + X_{K}^{2}\right]},$$
(1)

где  $U_S$  — действующее значение напряжения на статоре машины,  $R_R$ ' — приведенное активное сопротивление цепи ротора АД,  $\omega_0$  — скорость вращения магнитного поля в воздушном зазоре (синхронная скорость),  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  — скольжение ( $\omega$  — текущая скорость вращения вала),  $R_S$  — активное сопротивление цепи статора,  $X_\kappa$  — индуктивное сопротивление короткого замыкания АД.

В то же время приведенный ток фазы ротора определяется по выражению:

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

$$I_{R}' = \frac{U_{S}}{\sqrt{(R_{S} + R_{R}'/s)^{2} + X_{K}^{2}}}$$
 (2)

Подставив (2) в (1) и проведя преобразования, получим:

$$M = \frac{3U_S^2 R_R^{'}}{\omega_0 s \left[ (R_S + R_R^{'}/s)^2 + X_K^2 \right]} = \frac{3I_R^{'2} \left[ (R_S + R_R^{'}/s)^2 + X_K^2 \right] R_R^{'}}{\omega_0 s \left[ (R_S + R_R^{'}/s)^2 + X_K^2 \right]} = \frac{3I_R^{'2} \left[ (R_S + R_R^{'}/s)^2 + X_K^2 \right] R_R^{'}}{\omega_0 s \left[ (R_S + R_R^{'}/s)^2 + X_K^2 \right]} = \frac{3I_R^{'2} \left[ (R_S + R_R^{'}/s)^2 + X_K^2 \right] R_R^{'}}{\omega_0 s}$$

$$= \frac{3I_R^{'2} R_R^{'}}{\omega_0 s}$$
(3)

Таким образом, для двигателей с фазным ротором при наличии датчика тока ротора и знании коэффициента трансформации машины момент может быть определен как:

$$M = \frac{3I_R^{'2}R_R^{'}}{\omega_0 s},\tag{4}$$

где штрихом обозначено приведенное к статору значение соответствующего параметра.

На практике применение выражения (4) затруднено из-за необходимости вычисления приведенных значений тока ротора и активного сопротивления ротора. Тем не менее, оно находит практическое применение, например, в [3] для измерения массы груза подъемной установки.

В АДФР доступны прямому измерению параметры ротора, которые определяют электромагнитный момент двигателя (в частности, ток ротора и/или его активная составляющая). Однако эта составляющая может быть определена на основе измерения напряжения на статоре и известных сопротивлений обмоток машины. В [4-6] при исследовании особой схемы включения АДФР — машины двойного питания — была получена структурная схема, приведенная на рисунке 1 и описывающая работу как машины двойного питания в асинхронном режиме, так и АДФР (при отсутствии добавочного напряжения на роторе  $u_{Ri}$ ).

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

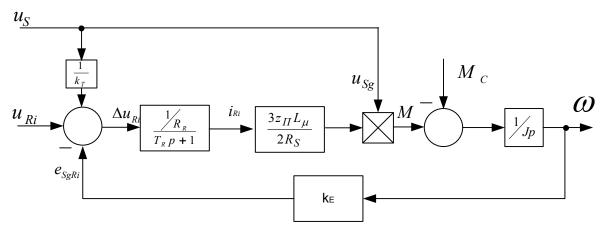


Рисунок 1 — Эквивалентная структурная схема машины двойного питания в асинхронном режиме

Для случая АДФР ( $u_{Ri}$ =0) схема, приведенная на рисунке 1, примет вид, показанный на рисунке 2.

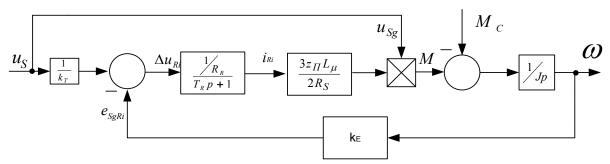


Рисунок 2 – Структурная схема АДФР

В схемах, приведенных на рисунках 1 и 2 используются следующие обозначения:  $k_T$  – коэффициент трансформации АДФР;  $e_{SgRi}$  – собственная ЭДС ротора;  $k_E$  – коэффициент внутренней обратной связи по ЭДС ротора,  $k_E = L_\mu \frac{u_{Sg}}{R_S}$ ;  $R_R$  = активное сопротивление цепи ротора;  $T_R$  – электромагнитная постоянная времени цепи ротора;  $z_\Pi$  – число пар полюсов машины;  $L_\mu$  – взаимная индуктивность статора и ротора;  $R_S$  – активное сопротивление цепи статора.

Схеме, приведенной на рисунке 2, соответствует следующая система уравнений:

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

$$\begin{cases}
e_{SgRi} = -k_E \omega, \\
\Delta u_{Ri} = \frac{u_S}{k_T} + e_{SgRi}, \\
i_{Ri} = \Delta u_{Ri} \cdot \frac{1}{R_R} \\
T_R p + 1,
\end{cases}$$

$$M = \frac{3z_{II}L_{\mu}}{2R_S} i_{Ri}u_{Sg},$$

$$\omega = \frac{M - M_C}{J_{\Sigma} p}.$$

$$(5)$$

Системе уравнений (5) соответствует следующее выражение для момента АД ФР:

$$M = \frac{3}{2} \cdot U_S \cdot \frac{z_{\Pi} L_{\mu}}{R_S} \cdot \frac{1/R_R}{T_R p + 1} \cdot \left(\frac{U_S}{k_T} - \omega k_E\right), \tag{6}$$

Выражение для момента АД ФР в статическом режиме может быть получено из (6) при условии p=0:

$$M = \frac{3}{2} \cdot U_S \cdot \frac{z_\Pi L_\mu}{R_S} \cdot \frac{1}{R_R} \cdot \left(\frac{U_S}{k_T} - \omega k_E\right) =$$

$$= \frac{3z_\Pi L_\mu U_S \left(\frac{U_S}{k_T} - \omega k_E\right)}{2R_S R_R}$$
(7)

Вычисление момента машины по (7) требует измерения скорости вращения ротора и напряжения на статоре АДФР и знания параметров машины — взаимной индуктивности статора и ротора, числа пар полюсов, активных сопротивлений статора и ротора.

Структурная схема датчика момента, соответствующая (6), представлена на рисунке 3.

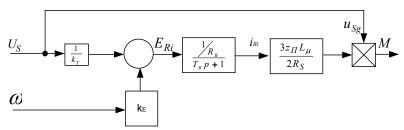


Рисунок 3 – Структурная схема датчика момента АД ФР

Переходя в (5) от непрерывных значений переменных к дискретным, получим следующую систему уравнений для вычисления дискретных значений момента АД ФР:

$$\begin{cases} e_{SgRi}[i] = -k_E \omega[i], \\ \Delta U_{Ri}[i] = \frac{U_S[i]}{k_T} + e_{SgRi}[i], \\ I_{Ri}[i] = \Delta U_{Ri}[i] \cdot \frac{1}{R_R} \left( 1 - e^{-\frac{T_o}{T_K}} \right) z^{-1} \\ e^{-\frac{T_o}{T_K}} z^{-1} \end{cases}$$

$$M[i] = \frac{3z_{\Pi} L_{\mu}}{2R_S} I_{Ri}[i] U_S[i],$$

$$(8)$$

где i — номер отсчета,  $T_{\partial}$  — период дискретизации, определяемый в соответствии с теоремой Котельникова.

В третье уравнение системы (8) входит z-преобразование передаточной функции апериодического звена 1-го порядка, вычисление которого может быть упрощено с применением изложенного в [7] принципа декомпозиции. С учетом представленного в [7] дискретного представления апериодического звена схема дискретного датчика момента примет вид, показанный на рисунке 4.

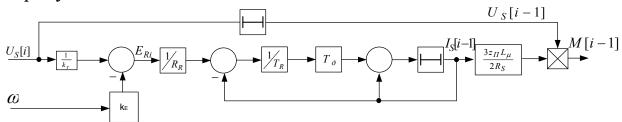


Рисунок 4 – Структурная схема дискретного датчика момента АД ФР

По приведенной на рисунке 4 схеме видно, что дискретный датчик задерживает измерение момента на 1 отсчет.

Также на основе выражения (9) может быть построен алгоритм идентификации момента АД ФР (рисунок 2).

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

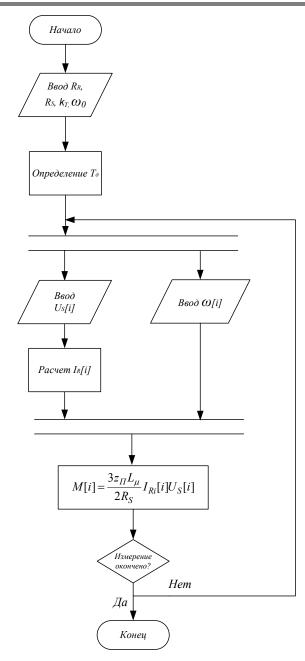


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма вычисления момента АД ФР

Таким образом, методика измерения момента АДАН может быть сформулирована следующим образом:

- 1) Выбор метода идентификации.
- 2) Составление уравнений для вычисления промежуточных величин.
- 3) Выделение базовых измеряемых величин.
- 4) Вычисление величин, производных от базовых.
- 5) Определение дискретных значений.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров

6) Переход от уравнений к структурной схеме и блок-схеме алгоритма с учетом принципа декомпозиции.

Таким образом, получены выражения, вычислительная структура и разработан алгоритм измерения момента АДФР, а также разработана методика измерения момента двигателя.

#### Библиографический список

- 1. Автоматический электропривод постоянного тока горнометаллургического производства / В. Ю. Островлянчик. Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2004. 383 с.
- 2. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
- 3. Метод измерения массы поднимаемого груза в двухскиповых шахтных подъемных установках / В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин, Т. В. Богдановская // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. 2014. с. 295-300.
- 4. Ostrovlyanchik, V.Yu Equivalent model of a dually–fed machine for electric drive control systems / V.Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 354.. P. 1–7 (012017). DOI: 10.1088/1757–899X/354/1/012017.
- 5. Ostrovlyanchik, V.Yu. Mechanical characteristics of the doubly–fed machine and its use in the hoist electric drive / V.Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin, D. A. Marshev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 206. P. 1–8 (012028). DOI: 10.1088/1755–1315/206/1/012028.
- 6. Equivalent structure of a double–fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric drive systems of mine winders / V. Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 377. [012041, 9 p.] DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012041.
- 7. Островлянчик, В. Ю. Автоматический электропривод постоянного тока горно-металлургичесского производства / В. Ю. Островлянчик. Новокузнецк: СибГИУ, 2004. 382 с.

УДК 681.51

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВІМ-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

# В. В. Грачев, Л. П. Мышляев, Д. Е. Коровин, Г. А. Кулюшин Сибирский государственный индустриальный университет, ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия

В статье рассматриваются технологии проектирования автоматизированных промышленных комплексов с использованием 3D моделирования зданий и сооружений — BIM-технологий. Описаны области эффективного применения BIM-технологий, а также их достоинства и недостатки. Приведен пример проектирования элементов АСУ ТП обогатительной фабрики «Шахта N = 12» традиционными способами и с использованием BIM-технологий.

Ключевые слова: автоматизированный промышленный комплекс, ВІМ-технологии, системы автоматизированного проектирования (САПР), моделирование, автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП)

Проектирование современных автоматизированных комплексов представляет собой сложную промышленных техническом организационном плане задачу. ограниченного времени и бюджета эффективно решать задачи проектирования невозможно без использования систем автоматизирования проектирования (САПР) - CAD (Computer-Aided Design).

Первые САПР, появившиеся в середине XX века, имели крайне ограниченный функционал. По мере развития функциональных возможностей САПР расширялись области их использования. В конце XX века, начале XXI стали выделять отдельное направление САПР, связанное с проектированием зданий и сооружений, а также всех их инженерных коммуникаций, в виде цифровых трехмерных моделей (рисунок 1) — создание цифровых двойников зданий и сооружений.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

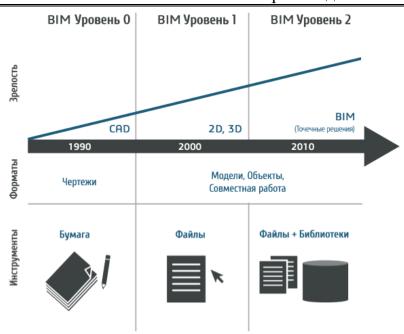


Рисунок 1 – Эволюция ВІМ-технологий при создании автоматизированных промышленных комплексов

цифровых двойников Создание зданий, частности автоматизированных промышленных комплексов. стало выполняться на базе BIM-технологий. BIM (Building Information Model/Modeling) – информационная модель/моделирование зданий и сооружений, под которыми в широком смысле понимают любые объекты инфраструктуры [1]. Процесс проектирования основан на создании и использовании 3D моделей абсолютно всех элементов зданий и сооружений, а также их инженерных коммуникаций (рисунок 2). Таким образом ВІМ-технологии предоставляют информационную платформу единую ДЛЯ всех участников автоматизированного промышленного комплекса проектировщиков, архитекторов, инженеров, строителей и т.д. ВІМ-технологии позволяют объединить труд множества людей разных направлений в единую оболочку, позволяя упростить и автоматизировать процессы проектирования и разработки.

Сразу следует отметить, что ВІМ-технологии не являются универсальными и всеобъемлющими технологиями проектирования автоматизированных промышленных комплексов в целом. Области эффективного применения ВІМ-технологий ограничены и связаны прежде всего с задачами построения 3D

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

моделей зданий и сооружений, их инженерных коммуникаций, то задачами пространственного характера - компоновка строительных конструкций, технологического оборудования, инженерных сетей (водные, электрические, газовые, канализационные, коммуникационные) и т.п. Задачи разработки программного, алгоритмического математического обеспечения АСУ ТП BIM-технологии не решают – для решения этих задач требуется использование иных инструментов И технологий проектирования [2, 3].



Рисунок 2 – 3D модель здания, построенная с помощью BIM

Главным достоинством использования ВІМ-технологий является высокая скорость проектирования 3D моделей, их наглядность, возможность быстрого внесения изменений на любом этапе проектирования, легкость в организации совместной работы множества исполнителей одного проекта.

Проектировщик, разработав информационную модель автоматизированного промышленного комплекса, может быстро получить необходимые чертежи и спецификации. На этапе создания проекта в процесс включается большое количество специалистов разных специальностей: соответственно, единая информационная модель позволит оптимизировать и ускорить их

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

совместную работу, исправить неточности и выпустить согласованные между собой чертежи — даже если эти специалисты изначально работают в отдельных файлах и программах, но в рамках одной платформы ВІМ [4].

На этапе строительства альтернативой бумажной проектносметной документации могут стать электронные чертежи. В качестве технических средств могут использоваться защищенные ноутбуки и планшеты.

Ha этапе эксплуатации здания уточненная после строительства информационная модель позволит, примеру, реконструкцию, учитывая расположение инженерных систем, рассчитать необходимость замены или иного ΤΟΓΟ оборудования, тем самым прогнозируя затраты.

Однако при использовании ВІМ-технологий имеются и недостатки. Прежде всего, это необходимость в переходном процессе к использованию ВІМ-технологий: требуется перестройка всех участников создания автоматизированного промышленного комплекса с традиционного локального проектирования на 3D моделирование. Возрастает ответственность специалистов, а также повышаются требования к их знаниям и квалификации как в технической, так и в информационной части [5, 6].

При моделировании объекта посредством BIM также необходимо учитывать, насколько глубоким должен быть уровень проработки BIM-модели.

Для примера на рисунке 3 показан примерный список атрибутов для разных уровней проработки здания корпуса обогащения углеобогатительной фабрики. Количество атрибутов цифрового двойника здания LOD (Level of development) значительным образом увеличивается от стадии к стадии.

Также одной из возможных проблем использования ВІМтехнологий проектировании автоматизированных при промышленных комплексов может быть формируемый ВІМсредствами набор проектной документации и форма представления документов. Подавляющее большинство программ построения ВІМ-моделей являются продуктами зарубежного производства и, как правило, не адаптированы и не локализованы в полной мере Российской проектирования ПОД нормы И строительства

Федерации [7, 8]. В 90 процентов случаев дополнительно требуются трудоемкие операции по локализации проектной документации под нормы и стандарты конкретного государства.

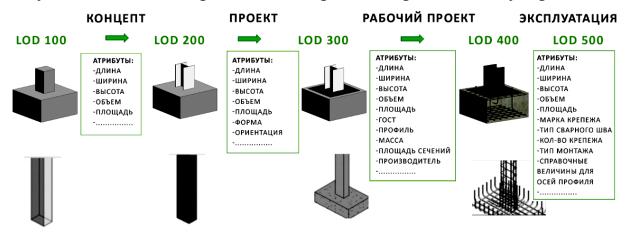


Рисунок 3 — Уровни проработки ВІМ-модели здания корпуса обогащения углеобогатительной фабрики

Несмотря на все указанные недостатки, сфера применения ВІМ-технологий при построении 3D моделей довольно широка, их экономически целесообразно использование эффективно. И Использование цифровых двойников зданий и сооружений в виде 3D моделей, построенных с использованием BIM, значительно упрощает процессы ИХ проектирования, строительства И эксплуатации.

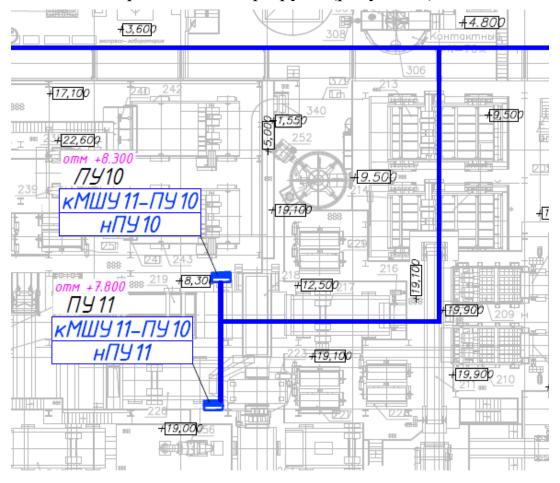
При создании углеобогатительной фабрики «Шахта №12» (г. Киселевск) традиционный был использован способ как проектирования АСУ TΠ. апробирован так способ И проектирования отдельных элементов АСУ ТП на базе ВІМтехнологий.

По результатам сопоставительного анализа двух способов проектирования АСУ ТП ОФ «Шахта №12» можно сделать следующие выводы.

При использовании традиционного метода проектирования по чертежным планам помещений главного корпуса задача размещения местных пультов управления и кабельных трасс временными решалась большими затратами очень приближенно. Проектировщик АСУ ТП вручную обрабатывал большое число разрозненных документов, при этом он должен был

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

понимать, как проходит каждая кабельная трасса, вручную рассчитывал потребность в кабельной продукции. Приходилось закладывать в проект длины кабелей с большим запасом, учитывая возможные альтернативные маршруты (рисунок 4).



- кабельная трасса до пультов управления ПУ10 и ПУ11

Рисунок 4 — Расположение пультов операторов тяжелосредных установок ПУ10 и ПУ11 и кабельных трасс до них в главном корпусе ОФ «Шахта №12»

Использование 3D модели главного корпуса углеобогатительной фабрики, построенного с помощью ВІМ-технологий, позволило бы проектировщику АСУ ТП лучше и быстрее понять, где необходимо располагать пульты управления. Кабельные трассы и длины кабелей до пультов управления были бы рассчитаны автоматические с большой точностью.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

В процессе монтажных работ на обогатительной фабрике «Шахта №12» при установке шкафов управления контроллеров в распределительные пунктах было выявлено, что некоторые шкафы оказались выше допустимой высоты помещений.

При выяснении причин такого наложения по габаритам с вентиляционной коммуникацией, оказалось, что ошибок в проектировании шкафов АСУ ТП не было. Проблема оказалась в вентиляционной системе распределительных пунктов, которая никак не учитывалась на чертежах распределительных пунктов.

Для устранения данной проблемы потребовалось выполнение работ по перемонтажу системы вентиляции, что привело к дополнительным финансовым и временным затратам. При наличии 3D планов помещений распределительных пунктов с отраженными на них инженерными системами и коммуникациями подобных проблем можно было избежать, так как просмотр помещений с нескольких ракурсов дал бы объективную информацию для принятия проектных решений по шкафам АСУ ТП.

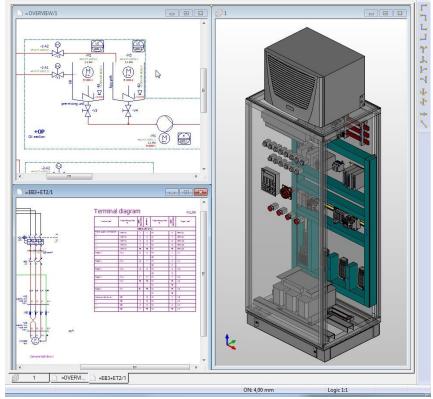


Рисунок 5 – Шкаф управления АСУ ТП ОФ «Шахта №12», спроектированный с помощью ВІМ-пакета EPLAN Electric

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

При проектировании шкафов АСУ ТП был апробирован ВІМпакет EPLAN Electric от компании EPLAN Software & Service GmbH & Co (Германия) для автоматического формирования проектной документации на основе 3D моделей компонентов, применяемых в данных шкафах. ВІМ-проектирование позволило существенно, в 5 раз сократить время на разработку проекта шкафов управления АСУ ТП (рисунок 5).

В заключение стоит отметить следующее. ВІМ-технологии не являются универсальным инструментом проектирования АСУ ТП, разработки например, не позволяют решать задачи информационного, математического и программного обеспечения, не решают проблемы алгоритмизации управления сложными технологическими процессами. Однако ВІМ-технологии – это весьма перспективные технологии в области построения 3D моделей автоматизированных промышленных комплексов, хорошо себя зарекомендовали решении при пространственнокомпоновочных задач. Безусловно, за ВІМ-технологиями будущее, настоящее время ИХ применение ограниченно необходимости дорогостоящих использования программных создания автоматизированных всеми участниками промышленных комплексов (проектировщиками, архитекторами, инженерами, из-за строителями) И высоких требований специалистам, работающим с ВІМ-технологиями. Если все эти сложности будут преодолены, то проектирование на базе ВІМтехнологий будет удобным, прозрачным, быстрым и гибким. Кроме того, полученные на этапе проектирования 3D модели зданий и сооружений (цифровые двойники) могут эффективно использоваться в дальнейшем – при строительстве, эксплуатации, обслуживании, обучении и т.п.

#### Список литературы

- 1. BIM // Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/BIM (дата обращения: 01.10.2020).
- 2. Сазыкин Г.П. Проектирование и строительство углеобогатительных фабрик нового поколения / Г.П. Сазыкин, Б.А. Синеокий, Л.П. Мышляев. Новокузнецк: СибГИУ, 2003. 126 с.

- СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов
- 3. Грачев В.В. Программное обеспечение систем автоматизации управления промышленными комплексами / В.В. Грачев, М.В. Шипунов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горнотопливной отраслях: тр. Шестой всерос. науч.-практ. конф. Новокузнецк: СибГИУ, 2014. С. 226 232.
- 4. BIM от проекта до готового здания. Информационное моделирование в строительной отрасли // Информационный портал Rengabim.com URL: https://rengabim.com/press-room/renga-v-smi/bim-ot-proekta-do-gotovogo-zdaniya-informacionnoe-modelirovanie-v-stroitelnoj-otrasli/ (дата обращения: 04.10.2020).
- 5. Талапов В.В. Основы ВІМ: введение в информационное моделирование зданий / В.В. Талапов. М.: Издательство: ДМК-Пресс.  $2011\ \Gamma$ .  $392\ C$ .
- 6. BIM как окончательная деградация проектировщиков // Строительный эксперт URL: https://ardexpert.ru/article/8981 (дата обращения: 04.10.2020).
- 7. Талапов В.В. Технология ВІМ. Суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий / В.В. Талапов. М.: ДМК-Пресс. 2015 г. 410 с.
- 8. BIM: как мы строим строителей на стройке // Habr URL: https://habr.com/ru/company/croc/blog/335808/ (дата обращения: 04.10.2020).

Грачев Виталий Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры автоматизации и информационных систем СибГИУ, заместитель директора ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», e-mail: vitaly.grachev@nicsu.ru

Мышляев Леонид Павлович – д.т.н., профессор, директор ООО «Научноисследовательский центр систем управления», e-mail: <u>mail@nicsu.ru</u>

Коровин Денис Евгеньевич – аспирант кафедры автоматизации и информационных систем СибГИУ, инженер-программист ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», denis\_corovin@mail.ru

Кулюшин Георгий Александрович — магистрант кафедры автоматизации и информационных систем СибГИУ, инженер-программист ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», e-mail: georgiy15091997@gmail.com

УДК 65.011.56

#### РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА ПРОЦЕССОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ В ШАХТЕ

### И. Р. Загидулин, А. С. Саламатин, М. В. Ляховец, Я. И. Прищепа

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Разработан учебно-исследовательский комплекс для проведения лабораторных работ обучающимися по исследованию процессов проветривания в шахте.

Ключевые слова: автоматизация, вентиляция, техническая структура, ПЛК, учебный комплекс

Одним из важнейших звеньев сложного технологического комплекса шахты, является система вентиляции шахтных выработок, перед которой стоит задача борьбы с вредными факторами в поземных горных выработках.

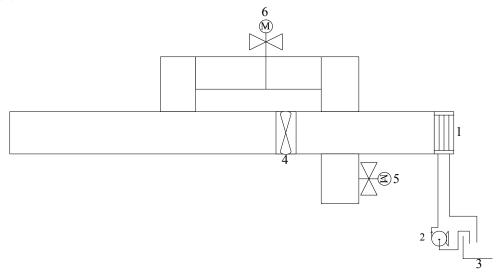
Суть вентиляции помещения состоит в подаче и распределении чистого (свежего) воздуха, а также в удалении загрязненного воздуха.

В этой связи большое значение приобретает создание и внедрение автоматизированных систем управления проветриванием шахт, способных обеспечивать надежность и маневренность вентиляции [1].

Так как присутствуют трудности для изучения процесса шахты на реальном объекте, кафедре проветривания TO на информационных Сибирского автоматизации И систем государственного индустриального университета реализован учебно-исследовательский комплекс (лабораторная установка) процессов проветривания Он предназначен В шахте. обучающихся по направлениям ПОДГОТОВКИ «Автоматизация технологических процессов и производств», «Информационные системы и технологии».

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

На рисунке 1 представлена структурная схема учебно-исследовательского комплекса.



1 – радиатор, 2 – насос, 3 – резервуар для нагрева воды, 4 – вентилятор, 5, 6 – задвижки.

#### Рисунок 1 – Структурная схема объекта исследования

На рисунке 2 представлена вход-выходная схема, отражающая какие параметры, необходимо учитывать на входе комплекса, а какие на выходе для выполнения основной задачи комплекса.



u1 – скорость вращения вентилятора, u2 – скорость лопастей насоса, u3, u4 - – положение задвижек, Q – расход воздуха, T – температура воздуха.

#### Рисунок 2 – Вход выходная схема

Комплекс выполняет следующие управляющие функции:

- регулирование положений задвижек;
- регулирование температуры воды для нагрева воздуха;
- регулирование температуры воздуха;
- регулирование расхода воздуха;
- регулирование скорости лопастей насоса;

- регулирование скорости вращения вентилятора.

Для реализации вышеуказанных функций выбраны следующие датчики.

- 1. Светодиодный интегрированный температурный передатчик с выходом 4-20мА для измерения температуры воды.
- 2. Термометр сопротивления из нержавеющей стали RTD PT100 Текст для измерения температуры воздуха. У данного датчика отсутствует выходной сигнал 4-20мА поэтому для него необходим преобразователь PT100 4-20mA.
- 3. Анемометр RZ GM816, который позволит вычислять расход воздуха косвенным путем.

Для управления поворотом задвижки выбраны электрические исполнительные механизмы микро-сервоприводы SG90 мини. Управление сервоприводами в свою очередь осуществляется микроконтроллером Arduino UNO R3.

Для управления всем комплексом выбран программируемый логический контроллер фирмы OMRON следующей конфигурации.

- 1. CJ1W-PD025 Модуль питания 24 V DC, Output capacity: 5 A, 5 V DC.
  - 2. CJ1M-CPU13 Модуль ЦПУ OMRON.
  - 3. CJ1W-ETN21 Модуль связи EtherNet.
  - 4. СJ1W-CLK21-V1 Сетевой модуль Controller Link.
- 5. CJ1W-SCU41-V1 Коммуникационный модуль 1x RS-232C + 1xRS-422/RS-485.
  - 6. CJ1W-TS562 Вход для термосопротивления (-200...650°С).
- 7. CJ1W-AD081-V1 Специальные модули входов/выходов для OMPOH Analog Input Unit 8 inputs (1 to 5 V, 0 to 5 V, 0 to 10 V, -10 to 10 V, 4 to 20 mA).
- 8. CJ1W-ID261 Модули входов/выходов для ОМРОН DC Input Units 24 V DC, 4.1 mA, 64 inputs, Fujitsu-compatible connector.
- 9. CJ1W-OD231 Модули входов/выходов для ОМРОН Transistor Output Units 12 to 24 V DC, 0.5 A, 32 outputs, sinking, Fujitsu-compatible connector.

На рисунке 3 представлена схема комплекса технических средств для лабораторной установки.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

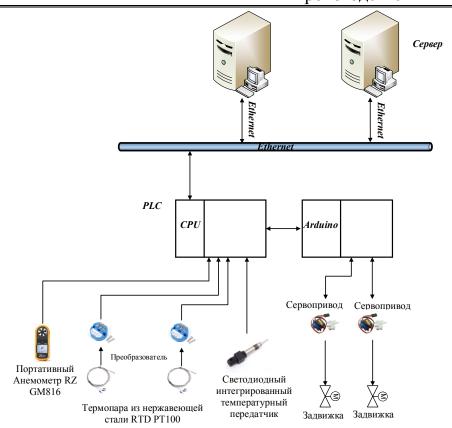


Рисунок 3 – Схема комплекса технических средств

- В качестве базового программного обеспечения лабораторного комплекса выбраны:
- пакет Wonderware System Platform компании Wonderware структурного подразделения корпорации Schneider Electric (Франция);
- модульный OPC сервер Kepware OPC Server компании Kepware (США);
- программное обеспечение CX-One для настройки, конфигурирования, программирования и отладки оборудования автоматизации компании Omron (Япония);
- программное обеспечение Arduino IDE для настройки, конфигурирования, программирования и отладки микроконтроллера Arduino Uno.

Комплекс имеет три режима функционирования: «Автомат», «Дистанция», «Местный». Первоначально введен только режим «Автомат», как необходимое условие работы.

Режим «Автомат» предполагает автоматическое выполнение следующих функций:

- включение/выключение вентилятора, насоса, нагревателя;
- изменение скорости вращения вентилятора и лопастей насоса;
  - поворот задвижек;
  - нагрев воды, воздуха;
  - измерение температуры воды, воздуха;
  - измерение расхода воздуха.
  - регулирование расхода воздуха в соответствии с заданием;
- регулирование температуры воздуха в соответствии с заданием.

Режим «Дистанция» предполагает запуск отдельных элементов комплекса с рабочей станции.

Режим «Местный» предполагает запуск лабораторного комплекса вручную с помощью терминала.

Разработанный научно-исследовательский комплекс предназначен для проведения лабораторных работ обучающимися по исследованию процессов проветривания в шахте. Комплекс может быть использован в качестве лабораторной установки или физической модели вентилятора местного (главного) проветривания в шахте.

#### Список использованных источников

1. Загидулин И.Р. К применению методов прогнозирования расхода воздуха в условиях шахты / И.Р. Загидулин // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019: труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2019. - С. 352-355.

УДК 004.051

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПРЕЦЕДЕНТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДСТОЯЩЕЙ ПЛАВКОЙ СТАЛИ

#### Р.С. Койнов, С.М. Кулаков, Е.Н. Тараборина

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Рассмотрена актуальная задача выбора оптимальных прецедентов при человеко-машинном управлении процессом плавки металла в сталеплавильных агрегатах (дуговых печах, кислородных конвертерах и т.д.), являющихся агрегатами циклического действия.

Ключевые слова: автоматизированное управление, технологические объекты, модельный подход, натурно-модельный подход. метод прецедентов, CBR-цикл принятия решений, функциональная структура системы управления, алгоритм выбора прецедентов.

Введение. В первые десятилетия 21 века, в сфере развития систем автоматизированного управления организационными (активными) объектами, значительное внимание уделяется применению метода прецедентов при выработке и принятии управляющих решений, [1,2,3]. Относительно недавно появились первые публикации по применению этого метода в системах человеко-машинного управления сложными (трудно формализуемыми) технологическими агрегатами циклического действия, к числу которых относятся современные агрегаты для [4,5].В публикациях выплавки стали, ЭТИХ предложен модифицированный CBR-цикл выработки управляющих решений, программ частности, управления каждым предстоящим Задача технологическим циклом. выбора оптимальных прецедентов ДЛЯ формирования программы управления предстоящей плавкой стали при человеко-машинном управлении сложным металлургическим агрегатом (CMA) циклического действия, электросталеплавильной печью, кислородным конвертером. агрегатом «печь-ковш» и т.д., является первой в модифицированном CBR-цикле. Её сложность заключается

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

нестационарности условий работы и большом разнообразии состояний СМА. Содержательная постановка задачи выбора наилучшего прецедента, из числа программ управления, реализованных в ранее выполненных плавках стали, может быть представлена в следующем виде.

<u>Задано</u>: 1. Информационная модель j-ой плавки-прецедента, структура которой дана на рисунке 1 и включает данные: о выходных воздействиях  $Y_j$  объекта управления, управляющих  $U_j$  и контролируемых внешних воздействиях  $W_j$  на объект, параметрах  $S_j$  состояния объекта.

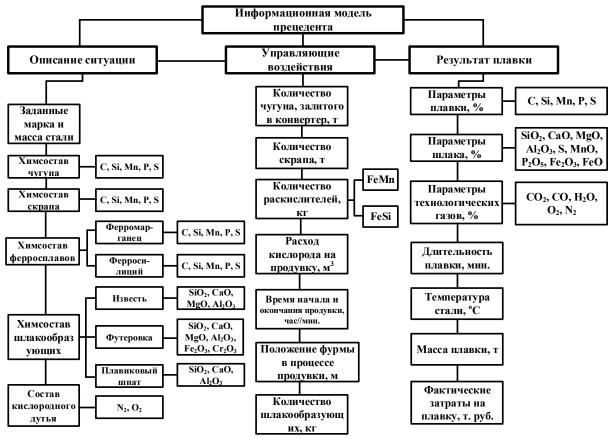


Рисунок 1 – Структура информационной модели плавкипрецедента

- 2. База прецедентов, включающая данные  $Z_j = \{Y, U, W, S\}_j$  о множестве  $J = \{j\}$  прошлых плавок стали за определённый период T времени (месяц, квартал, год).
- 3. Множество известных мер (метрик, критериев)  $M = \{m_1, m_2, ..., m_k\}$  близости ситуаций для прошлых и предстоящей плавки стали.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Например: евклидова мера, манхеттенская мера, мера Хэмминга, мера считающего расстояния [6] для расчёта значений которых, кроме меры считающего расстояния, все параметры ситуаций должны быть нормированы, в частности, приведены к безразмерному виду и единой шкале.

- 4. Ограничения, которые следует учесть при выборе прецедентов. В частности:
- актуальным прецедентом может считаться только та ранее выполненная на данном агрегате плавка стали, в результате которой была получена марка стали, которая задана на предстоящую плавку;
- в число актуальных прецедентов можно включать только те плавки из базы прецедентов, которые принадлежат подмножеству плавок проведённых на данном агрегате не далее, чем за сутки (неделю, декаду, месяц) до предстоящей плавки;
- допустимым прецедентом, для редко выплавляемых марок стали, может быть плавка выполненная на другом, однотипном данному, агрегате.

<u>Требуемся:</u> обоснованно выбрать лучшую, на множестве  $^{M}$ , метрику близости прошлых и предстоящей плавок стали и разработать алгоритм выбора заданного количества оптимальных, по критерию близости ситуаций, прецедентов, которые удовлетворяют ограничениям.

#### 1. Выбор метрики близости условий для плавокпрецедентов и предстоящей плавки стали в кислородном конвертере

Учитывая, что процесс автоматизированной шихтовки и ведения конвертерной плавки стали осуществляется мастером цеха и машинистом дистрибутора, то есть лицами, принимающими решения (ЛПР), последним следует поручить формирование программы управления предстоящей плавкой, в том числе в выбор для неё оптимального прецедента. При этом выбор конкретной метрики близости, первое время, должен выполняться в режиме советчика. Это означает, что АСУТП должна определять оптимальный прецедент по нескольким мерам, а ЛПР должно иметь возможность выбора лучшего из них.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

B качестве исходного множества близости выбраны следующие меры:

— Eвклидова мера  $d_E = (Z_j, Z^*)$ , которая представлена следующим выражением:

$$d_E\left(Z_j, Z^*\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(Z_{ji} - Z_i^*\right)^2} \tag{1}$$

где  $Z_j$  – вектор параметров j -го прецедента,  $Z^*$  – вектор параметров предстоящей плавки;  $^{Z}ji$  — нормированное значение  $^{i}$  го параметра j -го прецедента,  $z_i^*$  — нормированное значение i -го параметра предстоящей плавки.

2. Мера Хэмминга, представленная выражением:

$$d_{H}(Z_{j},Z^{*}) = \sum_{i=1}^{n} |Z_{ji} - Z_{i}^{*}|$$
 (2)

3. Манхеттенская мера является расширенным случаем меры Хэмминга или Евклидовой меры с той лишь разницей, что в ней используется коэффициент важности параметра, например:

$$d_{MH}\left(Z_{j},Z^{*}\right) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i} \left|z_{ji} - z_{i}^{*}\right|,$$

$$d_{ME}\left(Z_{j},Z^{*}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \alpha_{i} \left(z_{ji} - z_{i}^{*}\right)^{2}},$$
(3)

где  $\alpha_i$  – коэффициент важности i –го параметра плавки (как правило,  $\alpha_i \in [0,1]$ 

4. Обобщённое считающее расстояние: 
$$d_{O}\left(Z_{j},Z^{*}\right) = \sum_{i=1}^{n} \begin{cases} 1, \text{ если } z_{ji} \in \left(z_{i}^{*} \mp \delta Z_{i}\right) \\ 0, \text{ если } z_{ji} \notin \left(z_{i}^{*} \mp \delta Z_{i}\right) \end{cases} \tag{4}$$

где  $d_0(Z_j,Z^*)$  – количество координат векторов  $Z_j,Z^*$ , по которым эти векторы разнятся друг от друга на величину меньшую чем окрестности  $\{ \mp \delta Z_i \}$  координат  $\{ z_i^* \}$  вектора  $Z^*$ .

Оптимальному прецеденту соответствует минимум, использовании первых трёх мер, и максимум, при использовании четвёртой меры. Нормирование оценок  $\{\widehat{z}_i\}$  первичных данных, при использовании выражений (1-3), осуществлялось по формуле:

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

$$Z_{i} = \frac{\widehat{Z}_{i} - Z_{i}^{min}}{Z_{i}^{max} - Z_{i}^{min}} \tag{5}$$

Преимуществом меры (4) является необязательность операции нормирования первичных данных  $\{\bar{z}_i\}$  для получения значений  $\{z_i\}$ .

Сравнительный анализ рассмотренных метрик был выполнен на основе апробации алгоритмов их расчёта с использованием паспортных данных реальных плавок стали. Коэффициенты важности ( $\alpha_i$ , i=1,2,...,n) параметров металлошихты на данном этапе выбирались экспертно с учётом относительной трудности удаления серы и фосфора а также сродства углерода, кремния, марганца, хрома, железа и других элементов к кислороду. Исходя из показателей точности и сложности вычисления значений данных метрик для дальнейшего исследования были избраны формулы (3,4).

По моделирования результатам процесса поиска оптимальных прецедентов на основе натурных данных, в том числе с использованием таких характеристик, как марка стали, близость прецедента во времени к моменту начала предстоящей плавки химсостав чугуна, ферросплавов, стали, скрапа, шлакообразующих, при коэффициенте важности для каждого можно сделать следующий вывод: параметра  $\alpha_i = 1$ разному моделировании количеству используемых В прецедентов оптимальная мера. Это соответствует различная связано значениями параметров плавок-прецедентов конкретный расчетный период. Поэтому определение оптимальных прецедентов должно быть многовариантным по условиям выше сформулированной задачи выбора, в частности, по критериям ограничениям оптимальности, ПО на мощность множества рассматриваемых прецедентов, на количество имеющихся бункерах сыпучих материалов. Во всех вариантах учитывать высокую напряжённость работы ЛПР и отображать им для окончательного выбора минимальное количество, например 1 ¬ 2, оптимальных прецедента.

#### Процедура выбора оптимальных прецедентов.

Процедуру следует рассматривать контексте выработки предложенного ранее [7] цикла И реализации (рисунок 2; управляющих решений жирно выделены связанные с выбором и коррекцией оптимальных прецедентов).

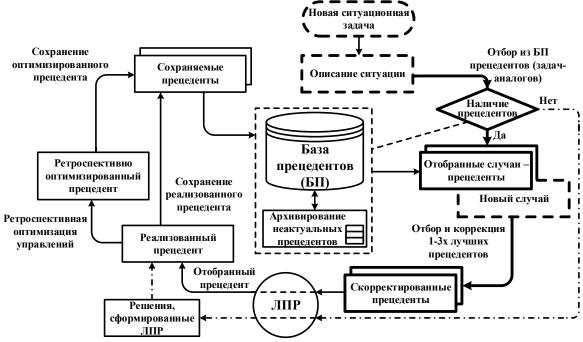


Рисунок 2 – Модифицированный цикл выработки и реализации управляющих решений в системе управления СМА

Предлагаемая человеко-машинная процедура выбора оптимальных прецедентов включает следующие действия, которые должны быть выполнены за 10 ÷20 минут до окончания текущей плавки стали:

- 1 На рабочую станцию ЛПР (мастера и оператора дистрибутора) поступает задание на предстоящую плавку (новая ситуационная задача), содержащее параметры ситуации для новой плавки, в том числе: заданную массу плавки и марку стали (химсостав, температуру), химсостав жидкого чугуна, скрапа, ферросплавов и шлакообразующих.
- 2 ЛПР осуществляет запуск процесса формирования 2-х ближайших, к текущему моменту времени, выборок из базы прецедентов и алгоритм отбора нескольких оптимальных прецедентов, при этом:

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

- 2.1 из 2-х выборок отбираются подмножества прецедентов, удовлетворяющих ограничениям по марке и температуре стали, массе плавки, наличию сыпучих материалов;
- 2.2 на основе заданной меры близости формируется ограниченная группа оптимальных (то есть наиболее близких к предстоящей плавке по значениям ситуационных параметров) прецедентов;
- 2.3 представители группы оптимальных прецедентов последовательно, в сжатой форме, отображаются ЛПР, которые, по своему усмотрению, выбирают прецедент для реализации. Если ЛПР не находят подходящий прецедент, то они могут поменять меру близости или ограничения и вновь обратиться к шагу 2.2 для формирования новой группы оптимальных прецедентов.
- 3 ЛПР принимают к реализации выбранный прецедент «как есть» или делает его корректировку.

Затем выбранные/уточненные параметры программы используются для управления процессом плавки стали.

Заключение. Предложена человеко-машинная процедура выбора, из регулярно пополняемой базы данных о прошлых оптимальных прецедентов для плавках стали, формирования предстоящей программы управления плавкой на основе отобранного критерия оптимальности и вариантных ограничений. многовариантная Сформирована задача выбора оптимальных прецедентов множество возможных метрик (критериев И Проведена апробация предложенных оптимальности). процесса поиска оптимальных прецедентов на основе натурных данных, позволившая выбрать две лучших метрики. Представлены: информационная модель прецедента применительно к системе управления выплавкой стали в конвертере, прецедентный цикл управляющих решений ЛПР В форме программы принятия управления, краткое описание процедуры выбора оптимальных прецедентов.

#### Литература

- 1 Карпов Л.Е. Адаптивное управление по прецедентам, основанное на классификации состояний управляемых объектов / Л.Е. Карпов, В.Н. Юдин // Труды института системного программирования РАН, Т. 13, ч. 2. М., 2007, с. 37-57.
- 2 Авдеенко Т.В. Система поддержки принятия решений в IT-подразделениях на основе интеграции прецедентного подхода и онтологии / Т.В. Авдеенко, Е.С. Макарова // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-podderzhki-prinyatiya-resheniy-v-it-podrazdeleniyah-na-osnove-integratsii-pretsedentnogo-podhoda-i-ontologii (дата обращения: 16.11.2020).
- 3 Варшавский П.Р. Метод поиска решений в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов / П.Р. Варшавский, Р.В. Алехин // International Journal "Information Models and Analyses" Vol.2 / 2013, Number 4. с. 385-392.
- 4 Прецедентный подход к формированию программ управления объектами циклического действия / С. М. Кулаков, В. Б. Трофимов, А. С. Добрынин, Е. Н. Тараборина // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS`2017: труды XI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), 14-16 декабря 2017 г. Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2017. С. 11–19. Библиогр.: с. 19 (18 назв.).
- 5 Кулаков, С. М. Метод прецедентов в системах управления сложными технологическими объектами / С. М. Кулаков, М. В. Ляховец, Р. С. Койнов // Труды XIII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2019, Москва, 17–20 июня 2019 г. Москва, 2019. 6 с.
- 6 Метрики и расстояния, используемые в методе кближайших соседей / Электронный ресурс. – URL: https://delirium-00.livejournal.com/7215.html (дата обращения: 15.11.2020).
- 7 Управление слабоформализуемым технологическим объектом на основе метода прецедентов / С. М. Кулаков, М. В. Ляховец, Р. С. Койнов, Е. Н. Тараборина // Приоритетные

направления инновационной деятельности в промышленности : сборник научных статей международной научной конференции, 31 января 2020 г. – Казань, 2020. – Ч. 1. – С. 113–120. – Библиогр.: с. 119–120 (14 назв.).

#### УДК621.311.11

#### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МИНИ-ТЭЦ В МАТLAВ

#### О. В. Кончакова, В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова, Сибирский государственный индустриальный университет г. Новокузнецк

В работе построена имитационная модель мини-ТЭЦ, которая содержит в себе модель турбины. Параметрами турбины управляет система регулирования с заданными значениями. Приводятся полученные зависимости.

Ключевые слова: мини-ТЭЦ, электроснабжение, имитационное моделирование, турбогенератор, турбина.

Одним способов решения задачи бесперебойного ИЗ электроснабжения В период аварии является подключение резервных станций. Мини-ТЭЦ позволяет с небольшими затратами обеспечить поддержку электроснабжения потребителей в условиях временного отключения основного источника, а в некоторых случаях рассматривать основной автономный источник как питания [1, 2].

Проектирование мини-ТЭЦ требует учитывать ряд параметров:

- режим работы всех инженерных систем в расчетные периоды, число которых может быть 8–24 и даже более;
- суточные, недельные, сезонные и годовые графики электрических нагрузок;
  - параметры используемого топлива;
  - возможность подключения к единой энергосистеме.

Одним из способов учесть все эти параметры при разработке мини-ТЭЦ является разработка компьютерной модели.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Моделирование систем электроснабжения возможно как с помощью создания своей программы на языке MATLAB, так и путем использования моделей типовых элементов системы электроснабжения из пакета расширения Simulink.

Упрощенный блок синхронный машины моделирует как, электрическую так и механическую характеристики простой синхронной машины. Электрическая система для каждой фазы состоит из напряжения источника последовательно с полным сопротивлением RL, которое осуществляет внутреннее полное сопротивление машины. Величина R может быть нулем, но величина L должна быть положительной. Модель выполнена в двух вариантах: Simplified Synchronous SI Units (параметры машины задаются в системе единиц СИ) и Simplified Synchronous Machine pu Units (параметры машины задаются в системе относительных единиц). В зависимости от варианта входные и выходные переменные машины также измеряются в системе единиц СИ или в относительных единицах.

#### Параметры блока:

Connection type: [Тип соединения обмотки статора]. Значение параметра выбирается из списка:

3-wire Y-звезда без нулевого провода;

4-wire Y-звезда с нулевым проводом.

Nom. power, L-L volt, and freq. [Pn (VA) Vn (Vrms) fn (Hz)]:

[Номинальная мощность Pn (BA), действующее линейное напряжение Un (B) и номинальная частота fn (Гц)].

Inertia, damping friction factor and pairs of poles [] (kg\*mA2) Kd (pu T/pu w) p]:

[Момент инерции J (кг\*мA2), коэффициент демпфирования Kd (o.e.T/o.e.w) и число пар полюсов p].

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Block Parameters: Simplified Synchronous Machine pu Units		
Simplified Synchronous Machine (mask) (link)		
Implements a 3-phase simplified synchronous machine. Machine is modeled as an internal voltage behind a R-L impedance. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.		
Use this block if you want to specify per unit parameters.		
Parameters		
Connection type:	3-wire Y	~
Mechanical input:	Mechanical power Pm	~
Nominal power, line-to-line voltage, and frequency [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ]:		
[187e6 13800 60]		
Inertia, damping factor and pairs of poles [H(sec) Kd(pu_T/pu_w) p()]		
[3.7 0 20]		
Internal impedance [ R(pu) X(pu) ]:		
[0.02 0.3]		
Initial conditions [ dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) ]:		
[0,0 0,0,0 0,0,0]		
Sample time (-1 for inherited)		
-1		
	OK Cancel Help App	oly

Рисунок 1 – Параметры блока Simplified Machine pu Units

#### Параметры блока:

Connection type: [Тип соединения обмотки статора]. Значение параметра выбирается из списка:

3-wire Y-звезда без нулевого провода;

4-wire Y-звезда с нулевым проводом.

Nom. power, L-L volt, and freq. [Pn (VA) Vn (Vrms) fn (Hz)]:

[Номинальная мощность Pn (BA), действующее линейное напряжение Un (B) и номинальная частота fn (Гц)].

Inertia, damping friction factor and pairs
of poles [] (kg\*mA2) Kd (pu\_T/pu\_w) p]:

[Момент инерции J (кг\*мА2), коэффициент демпфирования Kd (o.e.T/o.e.w) и число пар полюсов p].

Internal impedance [R (Ohm) L (H)]:

[Активное сопротивление и индуктивность обмотки статора R (Ом) L ( $\Gamma$ н)].

Init. cond. [dw (%) th (deg) ia, ib, ic (A)
pha, phb, phc (deg)]:

Начальные условия. Параметр задается в виде вектора, каждый элемент которого имеет следующие значения:

dw (%) - отклонение угловой частоты вращения (в %);

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

th (deg) - угловое положение ротора (град.); ia, ib, ic - начальные значения токов статора (A); phA, phB, phC - начальные фазы токов статора (град.).

Параметры машины задаются в системе единиц СИ или параметры машины задаются в системе относительных единиц ри, и маркировании изменения блочного вклада на Рт. Машинная скорость определена машиной инерция J (или константа инерции Н для ри машины) и различием между механическим вращающим моментом Тт, проистекающим из прикладной механической мощности Рт, и внутренний электромагнитный вращающий момент Те [2].

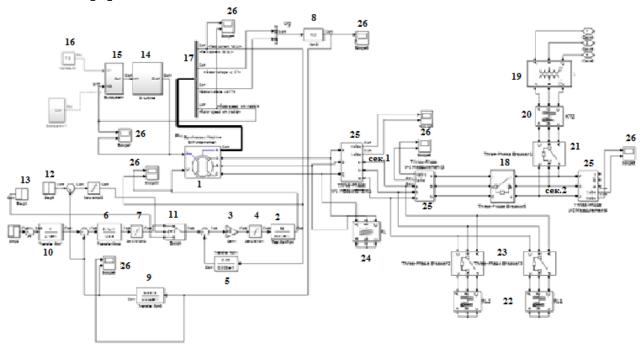


Рисунок 2 – Схема модели мини-ТЭЦ в MATLAB

На рисунке 2 отображены следующие блоки с установленными параметрами:

- 1. Блок 1 турбогенератор;
- 2. Блок 2 теристорный возбудитель;
- 3. Блок 3 регулятор тока возбуждения;
- 4. Блок 4 ограничитель регулятора тока возбуждения;
- 5. Блок 5 датчик тока возбуждения;
- 6. Блок 6 регулятор напряжения;
- 7. Блок 7 ограничитель регулятора напряжения;

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

- 8. Блок 8 преобразователь напряжения;
- 9. Блок 9 датчик напряжения;
- 10. Блок 10 фильтр;
- 11. Блок 11 реле;
- 12. Блок 12 источник питания;
- 13. Блок 13 источник питания с уставкой;
- 14. Блок 14 модель турбины;
- 15. Блок 15 блок системы регулирования;
- 16. Блок 16 блок задания турбогенератора (параметры);
- 17. Блок 17 измеритель параметров;
- 18. Блок 18 секционный выключатель;
- 19. Блок 19 трансформатор;
- 20. Блок 20 кабельная линия;
- 21. Блок 21 высоковольтный выключатель сети;
- 22. Блок 22 блок активно индуктивной нагрузки;
- 23. Блок 23 высоковольтный выключатель;
- 24. Блок 24 блок активно индуктивного сопротивления;
- **25**. Блок **25** измеритель;
- 26. Блок 26 осциллограф.

На схеме приведена модель линии теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) состоящая из следующих основных элементов и работающая по принципу: турбогенератор (1) - неявнополюсный генератор мощностью P=6 МВт, с номинальным напряжением 6,3кВ и током 1050A. Обмотка возбуждения 140B, 250A (с демпферной обмоткой).

В данной модели турбогенератора реализована возможность вывода параметров через специальное измерительное устройство для их анализа и применения в качестве обратных связей:

- номинальный ток возбуждения генератора;
- напряжение статорной обмотки по оси q, В;
- напряжение статорной обмотки по оси d, B;
- скорость ротора, рад/с.

На клемму Рт модели синхронного генератора поступает так называемая механическая мощность. В данном случае это сила вращения турбины. На вход Vf модели поступает напряжение от тиристорного возбудителя (фазы A, B и C). В модели реализована

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

схема управления возбуждением синхронного генератора с использованием теристорного возбудителя (2) с параметрами:

- коэффициент усиления 75;
- малая постоянная времени 0,01с.

Система двухконтурная, с подчиненным регулированием параметров: внутренний контур - тока возбуждения, внешний - напряжения статора двигателя.

Внутренний контур состоит из регулятора тока возбуждения G1 (3) с ограничением S1 (4) вышеназванного теристорного возбудителя. Объекты регулирования - обмотка возбуждения турбогенератора, датчик тока возбуждения (5). Контур тока возбуждения построен по модульному оптимуму. Внешним, по отношению к данному контуру, является контур напряжения статора синхронного генератора, состоящий из: регулятора напряжения (6) с ограничением (7) оптимизированного контура тока возбуждения, объекта регулирования статора синхронного цепи обратной связи, генератора, также содержащей a последовательно соединенные преобразователь напряжения (8) и датчик напряжения (9). Для снижения перерегулирования на входе контура напряжения установлен фильтр (10).

Контур настроен по симметричному оптимуму, при этом статизм по управлению равен 0.

В случае значительного снижения напряжения статора, контур напряжения отключается от внутреннего контура тока возбуждения, а на вход регулятора тока возбуждения (3) через реле (11) подается сигнал форсировки тока возбуждения от источника питания (12). Уставка переключения реле в режим форсировки установлена в устройстве (13). Коэффициент форсировки по току при этом равен значению 1,8, по напряжению 5. Уставка срабатывания реле равняется 5,8кВ.

Мини ТЭЦ содержит в себе модель турбины (14). Параметрами турбины управляет система регулирования (15) с заданными значениями. Блок регулирования выполнен таким образом, чтобы имелась возможность поддерживать постоянную скорость вращения турбогенератора. На вход системы (16) подается задание, в качестве обратной связи используется жесткая

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

обратная связь по скорости, полученная от комплекта измерителей параметров (17) синхронного генератора.

Напряжение от синхронного генератора мини ТЭЦ подается на первую (сек 1) из двух секций распределительного устройства РУ 10кВ. Через секционный выключатель (18) может быть подключена вторая секция (сек 2), электроснабжение которой осуществляется от общих сетей энергосистемы через трансформатор ТР1 110/10 кВ (19), кабельную линию КЛ2 (20), высоковольтный выключатель сети (21). Активно индуктивная нагрузка RL1 и RL2 (22) через высоковольтные выключатели Вг1 и Вг2 (23) подключена к секции 1.

Для нормальной работы модели в схему введено балластное активно-индуктивное сопротивление R, равное 100кОм (24). Для измерения напряжения токов в трехфазных сетях модели установлены различные измеряющие компоненты (25) с осциллографами (26).

Модель мини ТЭЦ настроена, работоспособна. Ниже изображены рисунки с графиками работы модели.

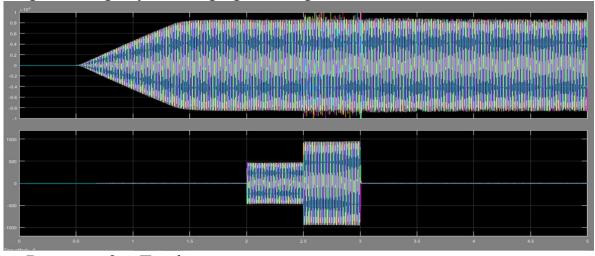


Рисунок 3 – Графики изменения напряжения и тока статора турбогенератора 6 MBт

На рисунке 3 и рисунке 4 показаны графики изменения напряжения и тока статора турбогенератора 6Мвт, тока возбуждения и скорости вращения синхронного генератора. В момент подаче возбуждения, а также набросе нагрузки на турбогенератор 6МВт. В данный момент напряжение синхронного генератора не снижается, так как система регулирования за счет

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

увеличения тока возбуждения поддерживает постоянное напряжение синхронного генератора.

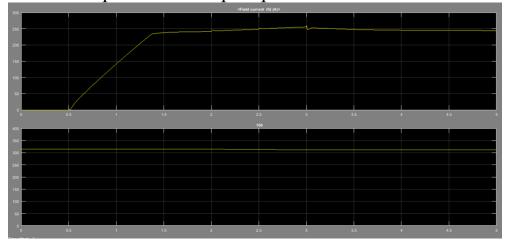


Рисунок 4 – Графики изменения тока возбуждения и скорости вращения синхронного генератора

На рисунке 5 изображены графики изменения скорости синхронного генератора и механической мощности. Из графиков видно увеличение механической мощности на валу турбогенератора в момент увеличения нагрузки. Момент возникает из-за незначительного снижения скорости синхронного генератора.

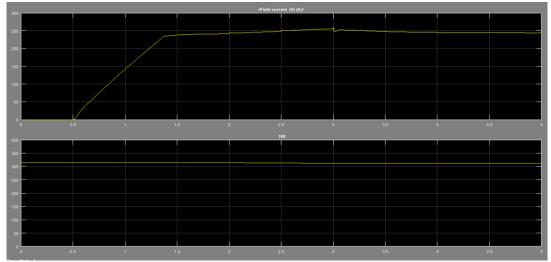


Рисунок 4 – Графики изменения тока возбуждения и скорости вращения синхронного генератора

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

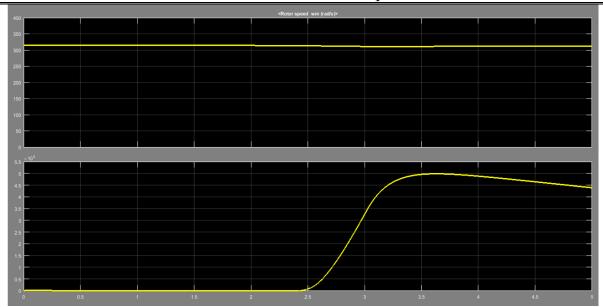


Рисунок 5 – Графики изменения скорости синхронного генератора и механической мощности

На рисунке 6 показаны графики изменения напряжения возбудителя и тка возбуждения синхронного генератора. В начальный момент при увеличении тока возбуждения синхронного генератора напряжение на теристорном возбудителе приобретает значение, максимально равное 750В. Далее на графиках показана работа при незначительных изменениях значения тока возбуждения. В любой момент изменения тока возбуждения наблюдается форсированное изменение напряжения.

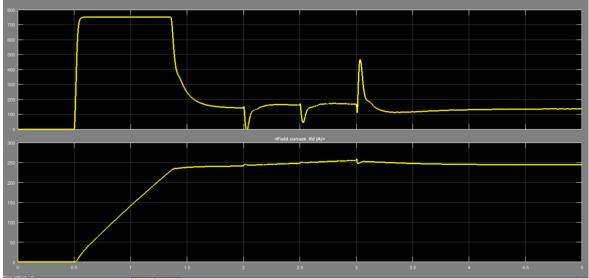


Рисунок 6 – Графики изменения напряжения возбудителя и тока возбуждения синхронного генератора

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Полученная модель мини-ТЭЦ позволяет оптимизировать режимы работы полученной установки. Изменяя параметры и применяя различные виды топлива получать графики изменения основных характеристик энергоустановки.

#### Библиографический список

- 1. В.Н. Чурашев, В.М. Маркова. Мини-ТЭЦ перспективное направление развития энергетики. 2015
- 2. Концепция развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России. М.: Минтопэнерго РФ. 1994.– 122с.
- 3. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. -М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

УДК 621.316.72

## ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# С. О. Корнева, Е. С. Кузнецова, В. А. Кузнецов Сибирский государственный индустриальный университет г. Новокузнецк

Рассмотрена программа рационализации электропотребления — управление спросом на электроэнергию, способы для ее осуществления в различных странах. Реализация программы управления спросом позволить увеличитьпотенциал энергосбережения в России.

Ключевые слова: управление спросом электроэнергии, энергосбережение, потребитель, снижение потребления электроэнергии, электроэнергетический рынок.

Возможность потребителей влиять на спрос – ключевая черта любого эффективно функционирующего конкурентного рынка. Это утверждение справедливо и для рынка электроэнергии. Особые свойства электроэнергии как товара (одновременность

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

производства и потребления, невозможность создания складских запасов или замены другим товаром) привели к тому, исторически потребители не имели практической возможности влиять на баланс спроса и предложения, аследовательно, и на цены на рынке. Потребители электроэнергии не уменьшают потребление электроэнергию. при цены В условиях росте на спроса активной стороной, неэластичности полностью определяющей цену электроэнергии, выступают производители.

Новые тенденции в электроэнергетике, появление цифровых интервальных счетчиков электроэнергии, развитие телекоммуникаций и «интеллектуальных сетей» (Smart Grid) предопределили возможность повышения эластичности потребления и привели к появлению концепции «управление спросом» (Demand Response — DR).

Управление спросом подразумевает снижение энергопотребления конечными потребителями при определенных экономических сигналах рынка электроэнергии, когда потребители добровольно изменяют график энергопотребления по результатам рынка «на сутки вперед» без дополнительных указаний от системного оператора, с получением выручки за осуществление такого снижения потребления. Управление спросом позволяет не только уменьшить расходы потребителей на электроэнергию, но и способствует ее удешевлению на оптовом рынке, повышению энергосистемы, снижению потребности надежности дополнительных генерирующих мощностях и соответственно сокращению уровня выбросов двуокиси углерода. Сегодня интерес к управлению спросом значительно вырос во всем мире, особенно в странах, переживших энергетический кризис и стремящихся удовлетворить спрос на электроэнергию не за счет строительства дорогостоящих генерирующих мощностей инфраструктуры, а используя эффективныерыночные механизмы.

В настоящее время в зарубежной практике был создан и используется ряд терминов, имеющих отношение к теме управления спросом.

«Рационализация спроса» (DemandManagement)— это программа, предназначенная для предоставления стимулов конечным потребителям или поставщикам услуг по управлению

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

спросом с целью повышения способности или возможности снизить нагрузку, когда цены на электроэнергию на рынке высоки или когда энергосистема находится в критическом состоянии в связи с пиковым уровнем нагрузки. Действия по рационализации спроса включают управление спросом и энергоэффективность.

(DemandSideResponse «Управление спросом» DSR, DemandResponse - DR) — добровольное изменение энергопотребления потребителем в ответ на изменение цены или отражающуюся режимную ситуацию, на надежности энергосистемы. В РΦ используется термин«ценозвисимое потребление (ЦП)». Управление спросом не включает в себя энергопотребления, обусловленное нормальной операционной деятельностью предприятия (например, снижение потребления электроэнергии в праздничные дни).

«Энергоэффективность» (EnergyEfficiency) — это снижение объема энергопотребления при сохранении того же уровня производства продукции и/или комфорта от использования оборудования и приборов, достигаемое за счет использования энергоэффективного оборудования или осуществления действий по энергосбережению.

Управление спросом является эффективным инструментом снижения цен на рынке электроэнергии в пиковые часы, когда для покрытия спроса на электроэнергию привлекаются менее эффективные генерирующие объекты. При этом относительно небольшое снижение потребления может привести к существенному снижению цены на электроэнергию.

Упрощенно эффект от участия потребителей в управлении спросом представлен на рисунке1. Плавный рост кривой предложения S сменяется резким ростом в замыкающей части, что соответствует использованию наиболее дорогих генераторов. Снижение потребления в пиковые часы с величины Q1 до величины Q2 приводит к превращению кривой спроса D1 в кривую D2 и снижению цены на электроэнергию на величину  $\Delta P$ .

Участие потребителей в технологиях управления спросом позволяет получить экономический эффект (получение платы за оказание услуг) не только им самим, но и всем участникам рынка за счет снижения выработки дорогостоящей электроэнергии

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

низкоэффективными генерирующими мощностями.

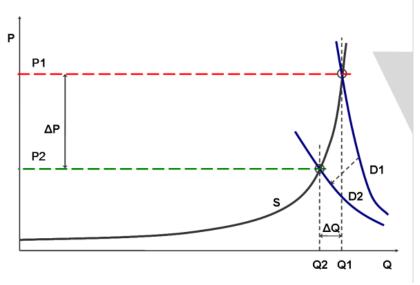


Рисунок 1 – Эффект от участия потребителей в управлении спросом.

Управление спросом может принимать различные формы в зависимости от объемов и режима потребления. Например, промышленные или крупные коммерческие предприятия могут реорганизовать свой процесс производства и график работы с тем, чтобы сместить время энергопотребления на периоды более низких цен. Участие в управлении спросом мелких предприятий и потребителей может включать смещение обогрева и кондиционирования воздуха в помещениях с периодов пиковых внепиковые, цен на подзарядку или электромобилей периоды привлекательных В цен, ДЛЯ потребителей, или изменение времени использования бытовой техники.

потребления Снижение электроэнергии также может за счет использования локальных осуществляться источников энергоснабжения потребителя (B TOM числе резервных генерирующих объектов, накопителей энергии И др.), регулирования интенсивности работы двигателей насосноизмененияустановки термостата перекачивающих систем, и/или кондиционирования холодильных систем установок, изменения или остановки производственного цикла, частичного отключения освещения и других действий.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

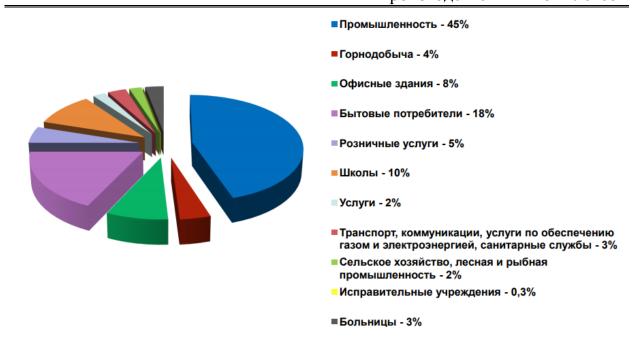


Рисунок 2 – Участие в программах управления спросом в различных сферах деятельности

Участие В программах управления спросом может осуществляться как самостоятельно потребителями потребителей (преимущественно большим объемом ДЛЯ c потребления электроэнергии), так и с помощью поставщиков услуг управлению спросом (DemandResponseProviders), являются агентами и несут ответственность за деятельность по управлению спросом от имени потребителей электроэнергии на оптовых рынках. Поставщики услуг по управлению спросом определяют возможности участия в управлении спросом для необходимое потребителей, устанавливают оборудование, внедряют операционные процессы и/или системы с тем, чтобы обеспечить функционирование управления спросом на стороне потребителей и его внедрение непосредственно в оптовый рынок. Поставщики услуг по управлению спросом конкурируют друг с другом, с тем, чтобы предлагать самый высокий уровень услуг, и потребители должны иметь возможность выбирать предложения услуг, которые им лучше всего подходят.

Управление спросом подразделяется на две категории:

121

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

стимулировать потребителей снизить уровень их потребления, когда эффект для рынка больше, чем выгода от использования электроэнергии такими потребителями;

• противоаварийное управление спросом применяется с тем, чтобы избежать непредвиденных перерывов в энергоснабжении в периоды ограниченного предложения электроэнергии.

Так, на американском например, рынкеэкономическое обязательством управление добровольным спросом является снижения нагрузки на рынке электроэнергии, когда рыночная цена на электроэнергию на оптовом рынке «на сутки вперед» или в времени превышает розничную ставку режиме реального электроэнергию ДЛЯ потребителя. Предоставление энергопотребления в определенном обязательства по снижению объеме не является необходимым.

участии в противоаварийном При управлении спросом потребление ИЛИ снижение нагрузки электроэнергии ограниченном объеме в условиях, когда системному оператору необходимо поддерживать надежность энергосистемы недостаточном предложении энергоресурсов или в аварийных ситуациях, является обязательным.

Неявное управление спросом используется в тех случаях, когда потребители соглашаются на применение электроэнергию, дифференцированных по времени потребления и отражающих стоимость электроэнергии и расходы, связанные с ее времени. потреблением в разные периоды Обладая информацией, потребители могут принимать решения о смещении энергопотребления с периодов высоких цен или позволить системе делать это автоматически. Тарифы, дифференцированные по времени потребления, предлагаются поставщиками электроэнергии и могут как подразделяться на ночные и дневные, так чрезвычайно динамичными и привязанными к почасовым ценам на оптовом рынке электроэнергии. В дополнение к этому некоторые страны ввели или рассматривают возможность внедрения тарифов электроэнергии распределительным передачу ПО дифференцированных по времени потребления, что направлено на смещение периода энергопотребления для избежания перегрузок в сети.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

При использовании схем явного управления спросом (иногда называемого «на основе стимулов» или «на основе объема») результат действий по управлению спросом продается на рынке электроэнергии заранее, иногда напрямую крупными промышленными потребителями или через поставщиков услуг по Потребители спросом. получают управлению специальное вознаграждение за изменения в энергопотреблении в ответ на соответствующий запрос, который вызван высокими ценами на необходимостью электроэнергию, В обеспечении энергосистемы организациями, ответственными за поддержание баланса энергосистемы, или перегрузками энергосистемы.

Программы, стимулирующие потребителей к участию в экономическом и противоаварийном управлении спросом, широко распространены в мире и активно применяются в США, Европейском Союзе, Австралии, Новой Зеландии, Китае и других странах. В каждой из стран они имеют свои особенности, определяемые спецификой принципов организации рынка электроэнергии, наличием или отсутствием рынка мощности, возможностями участия в нем потребителей, а также целями программ по управлению спросом и степенью их реализации.

Так, территории США например, на функционирует несколько рынков электроэнергии, существенно различающихся по географии (некоторые включают несколько штатов, находятся в пределах одного штата), структуре рынка, принятым стандартам и механизмам торговли, составу участников и другим показателям. Соответственно уровень развития управления спросом неодинаков на разных рынках страны.

Уровень развития управления спросом в Европе значительно различается по странам, при этом в некоторых странах он полностью отсутствует. Управление спросом активно задействовано на электроэнергетических рынках Великобритании, Ирландии, Финляндии и Франции.

При наличии достаточно широких возможностей и механизмов участия в управлении спросом развитие его потенциала (привлечение все большего числа потребителей к оказанию услуг) в Великобритании и в Европе в целом ограничено по ряду причин. К ним можно отнести обязательства по

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

сокращению выбросов парниковых газов (что лимитирует участие дизельных генераторов потребителей), наличие жестких требований к поставщикам услуг по DR, несовершенство методик определения среднего уровня энергопотребления, относительно которого будет определяться фактически осуществленное снижение, отсутствие четкой договорной основы и системы расчета платежей за оказанные услуги.



Рисунок 3 – Уровень развития управления спросом в Европе

В настоящее время в России предпринимаются первые шаги по стимулированию потребителей к участию в повышении энергоэффективности и выравниванию графиков нагрузки, например, за счет внедрения дифференцированных по времени суток тарифов.

создания условий целях ДЛЯ повышения энергоэффективностира- боты Единой энергосистемы России за счет привлечения потребителей оптового рынка к активному участию в регулировании спроса на электрическую энергию и мощность, получившему название «ценозависимого потребления», Правительства разработан проект постановления Федерации «О внесении изменений в Правила оптового рынка электрической энергии мощности, утвержденные И постановлением Правительства Российской Федерации от 27.12.11

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

<u>№</u> 1172».

Внедрение технологий управления спросом в российской электроэнергетике предусматривает, что потребители оптового рынка могут подавать заявки для участия в конкурентном отборе (КОМ) с указанием планируемого объема снижения мощности потребления, и по факту отбора заявки в КОМ примут на себя снижению потребления co обязательства ПО специальными требованиями по обеспечению готовности энергопринимающего оборудования к снижению потребления. В результате выполнения обязательств объем принятых себя покупки на формируемый по итогам месяца вот- ношении такого участника оптового рынка, снижается на учтенный при проведении КОМ объем ценозависимого снижения потребления.

Покупатели cценозависимым потреблением обязаны энергопринимающие поддерживать устройства В состоянии ценозависимому снижению готовности объема покупки электрической энергии. Способность покупателей исполнять свои обязательства по снижению потребления будет контролироваться путем тестирования до начала исполнения обязательств, а также случаев регистрации невыполнения покупателем потреблением ценозависимым условий поддержания устройств энергопринимающих В состоянии готовности электрической ценозависимому снижению объема покупки энергии в процессе исполнения обязательств.

выполнении покупателем c ценозависимым потреблением всех требований фактический объем ценозависимого снижения потребления мощности признается равным объему ценозависимого снижения потребления мощности, определенному по итогам КОМ. При невыполнении одного или нескольких условий работы режиме ценозависимого потребления фактический объем ценозависимого потребления снижения мощности равен произведению объема ценозависимого снижения потребления мощности, определенного ПО понижающих коэффициентов, учитывающих степень исполнения покупателем обязательств.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов



Рисунок 4 – Схема сравнения опыта управления спросом разных стран

За последние годы в зарубежной электроэнергетике накоплен обширный опыт применения управления спросом, в том числе по вопросам регулирования, технического внедрения, экономической эффективности, Материалы, перспектив развития И Т.Д. описывающие опыт, доступны на сайтах зарубежных ЭТОТ регулирующих органов, отраслевых ассоциаций, энергетических компаний и в средствах массовой информации на английском языке. В Российской Федерации подобные материалы ввиду ограниченного опыта по применению управления спросом не публикуются на регулярной основе и редко доступны на русском языке.

Энергоменеджмент многих предприятий не располагает достаточно квалифицированными специалистами, которые могут оценить эффективность энергосберегающих мероприятий, а также оценить технико-экономические и производственные последствия мер по рационализации суточных графиков электрической нагрузки.

#### Библиографический список

- 1. AO «СО ЕЭС», «Концепция функционирования агрегаторов распределенных энергетических ресурсов в составе Единой энергетической системы России. Агрегаторы управления спросом на электроэнергию», май 2019.
- 2. VYGON Consulting, «Demand Response» на Российском рынке: барьеры и перспективы, декабрь 2018.
- 3. Navigant Research, «Global Demand Response Capacity is Expected to Grow to 144 GW in 2025», 2016.
- 4. Энергетический центр Московской школы управления Сколково, «Распределенная энергетика в России: потенциал развития», январь 2018.
- 5. Гительман Л. Д., Ратников Б. Е., Кожевников М. В. Управление спросом универсальный метод решения современных проблем электроснабжения // Энергорынок. 2012. № 5. С. 44-49.

### УДК 681.51

# СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО СБОРА ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА

### Д.Е. Коровин, М.В. Ляховец

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

В статье рассматривается опыт разработки система распределенного сбора информации для системы визуализации конвейерного транспорта. Описана технические и базовое и программное обеспечения.

Ключевые слова: Автоматизация, распределенный сбор данных, OPC DA, OPC UA, Kepware KepsreverEX, конвейерный транспорт.

В настоящее время существует тенденция к укрупнению бизнеса – небольшие предприятия входят в состав более крупных «игроков». При этом на каждом предприятии использовались

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

различные решения как в выборе промышленных технологий, так и в выборе программного обеспечения. Наглядным примером таких укрупнений является объединение множества шахт в единый холдинг. После присоединения новой шахты к холдингу возникает множество вопросов, требующих решения. Одним из основных вопросов является сбор оперативной информации. Оперативная информация позволяет производить диагностику неисправностей, возникших при эксплуатации оборудования. Также она позволяет предотвращать повторное возникновение неисправностей воспользовавшись анализом собранных данных.

Однако доступ к оперативной информации не всегда возможен по нескольким причинам. С одной стороны, промышленные объекты могут быть территориально разобщены; с другой стороны – на различных производственных объектах могут быть установлены различные системы диспетчеризации.

Для решения проблемы сбора оперативной информации предлагается создать систему сбора информации из разных источников в единую базу для дальнейшего использования в центральной диспетчерской. [1]

Основной целью диспетчерской является обеспечение сбора информации с территориально распределённых объектов, которые при этом базируются на различных системах диспетчеризации. Разработанная система предназначена для решения задачи сбора данных с множества удаленных орс-серверов. Созданная система обеспечивает сбор, передачу и хранение данных о работе и причинах аварий конвейерного транспорта.

Функционально система представлена следующим образом:

1. Данные собираются посредством OPC (Open Platform Communications) DA (Data Access) с OPC-источника в OPC-сервер, установленный на шахте.

Использование технологии ОРС обусловлено тем, что ОРС — набор спецификаций стандартов. Каждый стандарт описывает набор функций определенного назначения. В настоящее время общепризнанным стандартом является только спецификации ОРС DA и ОРС UA.

2. Данные, собранные в ОРС-сервер шахты, передаются в промежуточный сервер, располагающийся в корпоративной сети

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

предприятия. Для передачи данных только в одну сторону используется протокол OPC UA (Unified Architecture).[2]

Для передачи данных как посредством OPC UA, так и посредством OCP DA использовался OPC Kepware KepserverEX, который может выступать как клиентом, так и непосредственно сервером.[3]

Для управления конвейерным транспортом применяются локальные системы управления с отображением и управлением через SCADA системы, выведенные в диспетчерский пункт шахты.

Для обеспечения повышенного уровня безопасности при передаче данных используется зашифрованный канал ОРС UA. Данный стандарт обеспечивает безопасность благодаря обмену уникальными сертификатами между сервером и клиентом, что позволяет строго ограничить список приложений способных подключиться к ОРС-серверу.

Реализованные решения по автоматизации сбора информации позволяют получать стабильный поток данных в распределенной доменной системе. При этом поток данных защищен и не позволяет производить изменение переменных (то есть работает в клиенту). Также сторону сервера К OT преимуществом данной системы является её масштабируемость. Она обеспечивается тем, что используются стандартные промышленные протоколы, которые обеспечивают быструю и стабильную работу с другими протоколами. Данная особенность позволяет использовать существующие наработки для введения новых объектов в систему сбора оперативной информации в кратчайший срок.

## Литература

1. Коровин Д.Е., Ляховец М.В. Информационное обеспечение автоматизированной системы сбора данных конвейерного транспорта // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова — Новокузнецк, 2020. - №6. - С. 229-232.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

- 2. Официальный сайт Unified Architecture: CША URL: https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/ (дата обращения: 11.09.2019);
- 3. Официальный сайт Kepware: США URL: https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/ (дата обращения: 11.09.2019).

УДК 621.31

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ

# **А. В. Костык, В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова** Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

В данной работе приводится анализ основных параметров генератора для разработки предиктивной диагностики. Предиктивная диагностика это новое направление в области диагностики работающего электрооборудования. Интеллектуальный анализ параметров позволяет сделать прогноз о состоянии электрооборудования.

Ключевые слова: предиктивная диагностика, анализ данных, статистика, нормальное распределение, частота генератора, температура активной стали, температура железа, температура меди, осевая и поперечная виброскорость, нейронные сети.

В настоящее время, в связи с активным развитием цифровой и полупроводниковой промышленности, происходит масштабная оборудования. цифровизация промышленного Датчики, установленные на определенных узлах агрегата, режиме реального времени считывают значения данных параметров, после значение сохраняется SCADA измеренное В предназначенной для диспетчерского управления и сбора данных, а также их архивирования. До определенного времени сохраненные были необходимы причины данные лишь ДЛЯ поиска возникновения неисправности оборудования. Но с развитием нейронных сетей и машинного обучения появляется возможность данные использовать ЭТИ ДЛЯ предупреждения возможных

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

неисправностей в конкретном узле агрегата, что дает возможность отойти от привычных методов диагностики и полагаться в большей степени на предупреждения, исходящие от системы, основанной на принципе машинного обучения. Такой метод диагностики получил название «Предиктивная диагностика», от англ. «predictive» - предсказывающий, пророческий.

Нельзя сказать, что предупреждение аварийных ситуаций без введения предиктивной диагностики невозможно, однако в связи с необходимостью постоянного визуального контроля технологических параметров системы, принятием решений и выдаче рекомендаций в реальном времени в условиях недостатка информации, учета большого количества разноплановых факторов и исходных данных, а также недостаточной квалификации персонала возникают аварийные ситуации [1].

Предиктивная диагностика основывается на принципе обнаружения всех потенциально опасных дефектов на ранней стадии развития, наблюдения за их развитием и на этой основе долгосрочный прогноз состояния составляется оборудования. экземпляр промышленного оборудования Каждый уникален, потому данная система должна настраиваться конкретного агрегата индивидуально. Данная система использует методы статистического и интеллектуального анализа данных. Анализируется текущие и исторические показания датчиков для составления предсказаний о будущих значениях каждого из параметров. Из исторических данных формируются типичные зависимости – паттерны, которые описывают поведение системы в определенных ситуациях. В настоящее время экспертные системы используются для решения различных типов задач в областях, как финансы, нефтяная и газовая промышленность, энергетика, космос, телекоммуникации транспорт, связь, производство, фармацевтическое химия, образование, др. продолжительное Методы предиктивного анализа время используются в биржевой и рыночной аналитике, для предсказания дальнейшего движения курсов, Анализ цен И Т.П. данных статистики. В большей производится ПО законам степени используется закон нормального распределения в связи с тем, что нормальное распределение встречается в нашей жизни на каждом

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

шагу. Так, если построить гистограмму роста тысячи случайно результате получится людей, TO В нормальное распределение, имеющее пик в точке, которая соответствует среднему росту в группе людей, но при этом будет наблюдаться некоторый разброс вокруг среднего. Большинство значений, близких к среднему, концентрируются в центре, а незначительная часть значений, сильно отклоняющихся от среднего, равномерно распределяется вправо и влево [2]. Помимо анализа данных, предиктивной диагностики быть обучена система должна распознавать предаварийные ситуации, используя нейросети и машинное обучение, основываясь на исторических данных.

Говоря о том, что такое нейронная сеть, стоит отметить, что это совокупность нейронов, соединенных друг с другом определенным образом. Нейрон представляет из себя элемент, который вычисляет выходной сигнал (по определенному правилу) из множества входных сигналов. Между собой нейроны соединены абсолютно по-разному, это определяется структурой конкретной сети [3].

Одним из важнейших применений нейронных сетей в системе предиктивной диагностики является решение задачи классификации. Оно представляет собой разделение объектов по определенным и заданным заранее признакам. Также имеется возможность выделить объекты, не подходящие по признакам ни к одной группе.

Для анализа работы синхронного генератора, были получены время работы состоянии во временной 3a промежуток, равный трем календарным месяцам. В данном случае мы измеряем такие параметры, как температура активной стали возбудителя в точках 1, 2, 3, 4, 5; температура меди фаза 1, 2, 3 в точках 1, 2, 3; температура железа, фаза 1, 2, 3 в точках 1, 2, 3; температуры заднего и переднего подшипников генератора; осевая, поперечная и вертикальная виброскорость переднего подшипника генератора; осевая, поперечная и вертикальная виброскорость заднего подшипника генератора; активная мощность генератора; реактивная мощность генератора; частота вращения ротора точка 1, 2; частота генератора.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

В программной среде Statistica были получены результаты обработки этих данных в виде графиков. Отчетливо видно, что нормальному закону распределения соответствуют только такие параметры, как частота генератора (Рисунок 1), температура железа фаза II, паз №25 т.2 (Рисунок 2). А такие параметры, как температура активной стали возбудителя, т.2 (Рисунок 3), виброскорость переднего подшипника генератора, вертикальная (Рисунок 4), температура меди, фаза I, паз №2, т.2 (Рисунок 5), а также остальные параметры не подчиняются нормальному закону распределения.

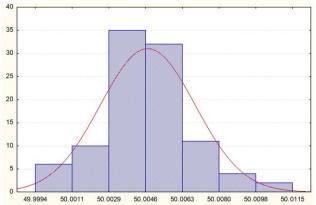


Рисунок 1 – Гистограмма распределения значений параметра «частота генератора»

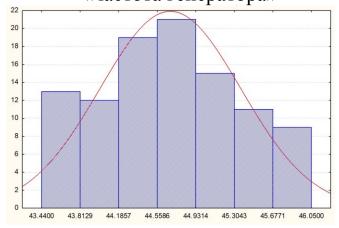


Рисунок 2 – Гистограмма значений параметра «температура железа фаза II паз №25, т.2»

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

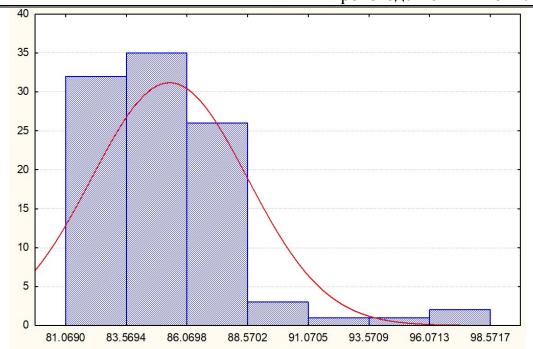


Рисунок 3 – Температура активной стали возбудителя, т.2

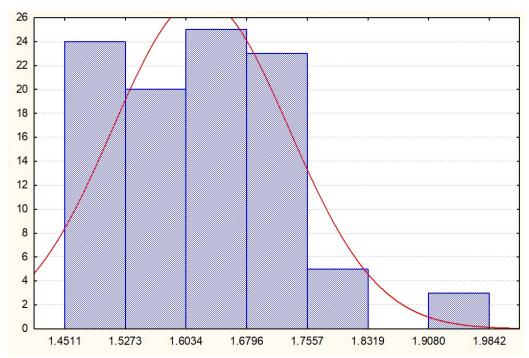


Рисунок 4 - Виброскорость переднего подшипника генератора, вертикальная

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

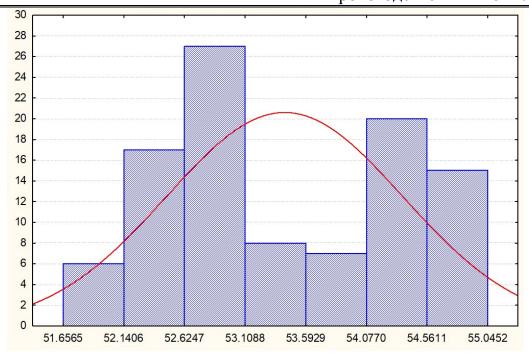


Рисунок 5 - Температура меди, фаза I, паз №2, т.2

Таким образом, из-за недостаточного объема параметров для статистики, тяжело сделать вывод виде распределения 0 генератора. В дальнейшем параметров для анализа данного потребуется больший объем данный, чтобы определить распределения параметров исследования И построить В дальнейшем нейронную модель агрегата.

### Список литературы:

- 1. Абу-Абед Ф.Н., Допира Р.В., Попов П.Г., Кордюков Р.Ю. Построение нейросетевого классификатора для снижения риска аварий при эксплуатации сложных технических систем
- 2. Добреньков В.И., Кравченко А.И. Фундаментальная социология: В 15 т. Т. 2: Эмпирическая и прикладная социология. М.: ИНФРА-М, 2004. VI, 986 с.
- 3. Гафаров Ф.М Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие / Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. 121 с.

- СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов
- 4. Использование методов предиктивной аналитики для обработки сигналов с датчиков частоты вращения роторных машин/ Ильичев В. Ю., Юрик Е. А./ Technical Sciences.
- 5. Обзор по теме исследования «Моделирования системы управления знаниями на основе нейросети» / С. Тарабринс. Международный научный журнал
  - 6. «Молодой ученый» №22 (208)/2018
- 7. Создание систем предиктивной аналитики для энергетических объектов/Андрюшин А. В., Щербатов И. А., Цуриков Г. Н., Титов Ф. М. Московский энергетический институт.
- 8. Разработка архитектуры интеллектуальной системы функциональной диагностики турбогенератора/ Розум Т. И., Полищук В. И. Томский политехнический университет/ Вестник Сибири. 2015. Спецвыпуск.

УДК 621.317.38

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И УЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

# С. А. Кузьмин, Е. С. Кузнецова, В. А. Кузнецов Сибирский государственный индустриальный университет г. Новокузнецк

Рассмотрено устройство для измерения и учета расхода электроэнергии, а так же состояние систем учета электроэнергии на современных промышленных предприятиях. Проведен сравнительный анализ трех крупных производителей АСКУЭ.

Ключевые слова: электроэнергия, энергоэффективность, системы учета электроэнергии, расходы, промышленное предприятие.

Стоимость электроэнергии на современных промышленных предприятиях составляет 20 - 30% от себестоимости продукции, а для более энергозатратных предприятий - 40% и более. Поэтому, многие промышленные предприятия стремятся к максимальной энергоэффективности на своих производствах.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Энергоэффективность - это полезное, или же эффективное, использование энергоресурсов, при котором для обеспечения установленного уровня потребления энергии при технологических процессах на производстве используется меньшее количество энергетических ресурсов.

Одним из способов достижения максимальной эннергоэффективности на промышленном предприятии является устройство для измерения и учета расхода электроэнергии на производстве, которое используется для измерения условнопостоянных и условно-переменных расходов.

Известно, что расходы электроэнергии подразделяются на условно-переменные расходы УΠР расходы энергии выполнение основных технологических операций и условнопостоянные расходы УПСР расходы электроэнергии вспомогательные нужды, которые не зависят от изменения объема производства; например, расход энергии на освещение, привод отопление, устройств, вентиляционных кондиционирование воздуха. Переменную часть расхода электроэнергии определяют обычно укрупненно на основе времени работы оборудования или по сводным нормам, а постоянную часть - на основе нормативов освещенности, отопления помещений и т.д [6].

Разделение потребления электроэнергии на вышеуказанные части необходимо также для бухгалтерского учета, где понятия УПР и УПсР существуют, но методы расчетов и полученные результаты достаточно приблизительны.

Устройство для измерения и учета расхода электроэнергии (рисунок 1) состоит из информационно-измерительного комплекса (1), информационно-вычислительного комплекса (2), записывающего устройства (3), ячеек памяти (4, 5), управляющих ключей памяти (6, 7), блока логики (8), датчика режима работы производства (9) и вычислителя (10).

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

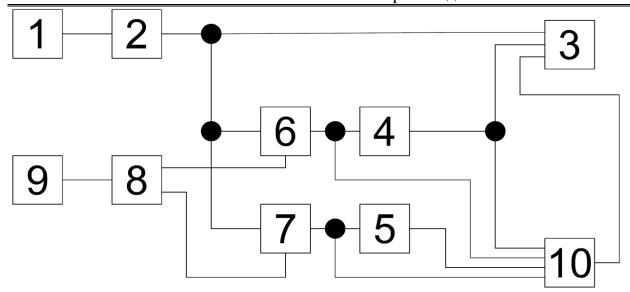


Рисунок 1 – Блок-схема

Для дальнейшего использования предлагаемого устройства для измерения и учета расхода электроэнергии в существующие электроэнергии на предприятиях, необходимо системы учета автоматизированной рассмотреть понятие системы электроэнергии (далее АСУЭ), ее структуру, проанализировать задачи, которые позволяет решить данная система. А также провести тщательный обзор ведущих производителей отечественном рынке, для определения возможности интеграции запатентованного устройства предлагаемого достижения энергосбережения поставленных целей области В И энергоэфективности.

Основной целью создания АСУЭ на промышленном предприятии является контроль текущих параметров режимов электропотребления, который необходим для достижения следующих задач [1]:

- получение информации о текущих параметрах режимов электропотребления;
- получение информации для выполнения задач по эффективному управлению электропотреблением на промышленном предприятии;
- разработка методов оптимизации электропотребления на основе данных анализа режима потребления электроэнергии.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

На промышленном предприятии АСУЭ состоит из двух систем учета – коммерческого и технического.

Коммерческий учет электроэнергии используется для обеспечения финансовых расчетов между поставщиком электроэнергии и потребителем.

Технический учет электроэнергии служит для контроля потребления электроэнергии структурными подразделениями предприятия — цехами, производствами и т.д.

В состав автоматизированной системы учёта входят: один или несколько измерительно-информационных комплексов (ИИК), информационно-вычислительный комплекс электроустановок (ИВКЭ) и информационно-вычислительный комплекс (ИВК) [3].

Обобщенная структура АСУЭ представляет собой три уровня (рисунок 2):

- 1) нижний уровень включает в себя ИИК (проведение измерений со счётчиков и датчиков);
- 2) средний уровень включает в себя ИВКЭ (консолидация информации с помощью УСПД по электроустановке либо группе электроустановок);
- 3) верхний уровень включает в себя ИВК (персональный компьютер для хранения и выдачи отчётной информации).



Рисунок 2 – Состав технического обеспечения АСУЭ

В состав информационно-вычислительного комплекса (ИВК) входят:

1) технические средства организации каналов передачи данных (поддержка интерфейсов RS-232, 485 и др.);

- СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов
- 2) специализированный контроллер для обеспечения информационного взаимодействия между ИВК и устройствами среднего уровня (в случае отсутствия этого уровня между ИВК и нижним уровнем);
- 3) компьютер в серверном исполнении для обеспечения функции центра сбора и хранения коммерческой информации;
- 4) технические средства для организации локальной вычислительной сети (LAN-карта или порт) и разграничения прав доступа к информации.

В состав ИВКЭ входят:

- 1) технические средства организации каналов передачи данных;
- 2) специализированный контроллер (УСПД и др.) для обеспечения интерфейса доступа к устройствам нижнего уровня.

Устройство сбора и передачи данных (УСПД) многофункциональное устройство, работающее в автоматическом АСУЭ субъекта составе режиме оптового рынка, обработку, хранение, осуществляющее прием, отображение информации от счетчиков электроэнергии и обеспечивающее передачу данных (по различным каналам связи) на вышестоящие уровни сбора и обработки информации.

Измерительно-информационный комплекс (ИИК) объединенная конструктивно совокупность функционально программно-технических технологических объединенных И средств учёта электроэнергии. В основу ИИК системы учёта входят измерительные трансформаторы тока (TT), измерительные трансформаторы напряжения (ТН), их вторичные цепи, счётчики электрической энергии и их интерфейсы.

Рассмотрим производителей современных высокотехнологичных систем учета электроэнергии.

- АО «ННПО им. М.В, Фрунзе» производит автоматизированную систему коммерческого учёта электроэнергии на базе КТС МАЯК (рисунок 3), которая служит для [5]:
- обеспечения эффективного оперативного контроля за рациональным использованием электроэнергии;
- минимизации затрат электроэнергии, уменьшение размеров дисбаланса в системах энергоснабжения;

- упорядочивания взаимных финансовых расчётов, структурирование затрат в единой базе данных, гибкое тарифицирование;
- сокращение издержек на обслуживание ряда отдельных систем учета;
- устранение возможности хищения электрической энергии;
- управление потреблением абонентов (полное или частичное ограничение подачи электрической энергии).

Основные функции КТС Маяк:

- считывание коммерческих данных, журналов событий с приборов учёта и устройств, параметров качества электрической
- ограничение, отключение или включение потребителей автоматически или по команде оператора;
- автоматическое параметрирование электросчётчиков и устройств;
- мониторинг технического состояния компонентов системы;
  - архивирование информации;
  - передача данных в смежные системы;
  - гибкость и масштабируемость системы.

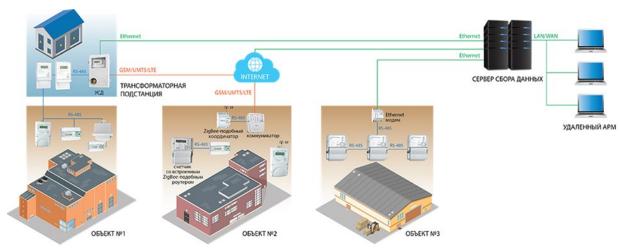


Рисунок 3 – АСКУЭ предприятий промышленности

Такой производитель, как АО «Радио и Микроэлектроника», разработал автоматизированную систему коммерческого учета электроэнергии ПП РМС 2060п (рисунок 4).

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

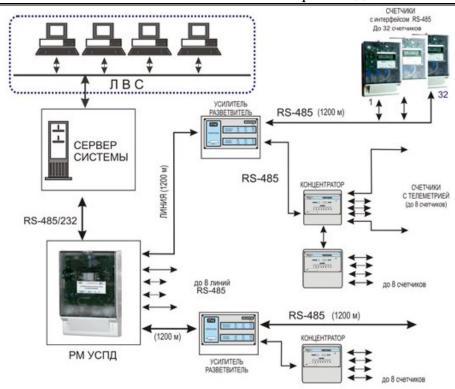


Рисунок 4 – Структурная схема системы РМС 2060п

Используемые технические средства [4]:

- трёхфазные счетчики СТЭБ-04H/1-7,5-К, СТЭБ-04H/1-50-К с интерфейсом RS-485;
  - устройство сбора и передачи данных РМ УСПД-2064;
  - концентратор счетчиков РМКП-2062;
  - повторитель сигналов RS485-RS485 РМПР-2065 Функциональные возможности:
- учет и анализ потребления электроэнергии в масштабах предприятия;
  - расчет баланса потребленной электроэнергии;
- автоматический дистанционный съем информации с каждого счетчика с передачей этой информации по каналам связи на верхний уровень и формирование базы данных потребления электроэнергии;
- постоянный мониторинг величин заявленной мощности P, W, Q;
- слежение за превышением заявленной и потребленной мощности со звуковой и визуальной сигнализацией;
  - отображение на экране монитора данных с заданным

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

периодом от 1 до 30 минут в цифровом и графическом виде, текущего непрерывного графика;

– дискретность построения подробных профилей от 1 до 30 минут.

АО «Электротехнические заводы Энергомера» предлагает комплексные решения по автоматизации учета электроэнергии для промышленных предприятий и предоставляет полный перечень услуг по автоматизации учета от «проектирования» до «внедрения» (рисунок 5) [2].

#### Преимущества:

- гарантированная доставка информации от прибора учета на верхний уровень (два взаимодополняющих канала связи PLC и радио);
- автоматический и полуавтоматический контроль превышения заданного уровня небаланса;
- постоянный мониторинг за параметрами нагрузки, потребления и генерации, параметрами и качеством сети;
- мгновенная сигнализация с нижнего и среднего на верхний уровень о нарушении установленных критериев;
- эффективная схема оповещения и управления потребителем;
- возможность учета различных энергоресурсов без дополнительных затрат (счетчики воды, газа, тепла);
- низкая стоимость точки учета за счет применения интеллектуальных и интегральных решений.

#### Состав комплекса:

- трехфазные многофункциональные счетчики активной и реактивной энергии CE 303, CE 304 и ЦЭ 6850M;
  - устройство сбора и передачи данных УСПД СЕ 805.

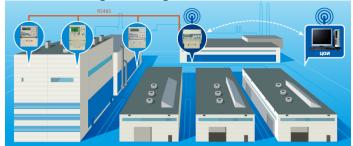


Рисунок 5 – Структурная схема системы АСКУЭ на базе оборудования АО «Электротехнические заводы Энергомера»

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Несмотря на все плюсы существующих автоматизированных систем учета электроэнергии, они не позволяют разделять расходы электроэнергии на условно-постоянные и условно-переменные, и как следствие, обеспечить максимальную энергоэффективность на предприятии. Принимая промышленном во внимание возрастающую необходимость экономии электроэнергии, обеспечить рассмотренного устройства внедрение поможет рациональное использование энергоресурсов.

#### Список использованных источников

- 1. Бедерак Я. С. Применение АСУЭ на промышленных предприятий для решения задач энергосбережения [Текст] / Я. С. Бедерак, А. В. Дегтярев. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКА ЭНЕРГОАУДИТ. 2010. №5 С. 28-35.
- 2. Завод измерительных приборов «Энергомера» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <a href="http://www.energomera.ru/">http://www.energomera.ru/</a>
- 3. Кузьмин С.А. Современное состояние систем учета электрической энергии [Текст] / С.А. Кузьмин, Е.С. Кузнецова, В.А. Кузнецов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. Труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции. Сибирский государственный индустриальный университет. 2018. С. 120-124.
- 4. Научно-производственное предприятие АО «Радио и Микроэлектроника» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ao-rim.ru/
- 5. Нижегородское научно-производственное объединение имени М.В.Фрунзе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <a href="https://www.nzif.ru/">https://www.nzif.ru/</a>
- 6. Способ измерения и учета расхода электроэнергии на производстве и устройство для его осуществления: пат. 2699925 Рос. Федерация: МПК G01R 21/06, G01R 21/133 / Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С., Романюк С.Ю., Громов В.Е., Кузьмин С.А. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «СибГИУ» № 2018142905; заявл. 04.12.18; опубл. 11.09.19, Бюл. № 26. 11 с.

УДК 621.926.3

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДРОБИЛЬНОЙ ВАЛКОВОЙ МАШИНОЙ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

## **А.Г. Никитин**, **К.В. Тагильцев-Галета**, **К.А. Чайников** Сибирский государственный индустриальный университет

Разработана система аварийного управления работой дробильного агрегата, позволяющая, используя совместную оценку параметров механической и электрической частей, устранять аварийные ситуации из-за попадания в зону разрушения недробимых тел.

Ключевые слова: валковая дробилка, аварийная ситуация, автоматический контроль.

Многие промышленные производства, в том числе и горные, перерабатывают и используют в больших количествах сыпучие материалы различных классов крупности. В большинстве случаев нужная крупность достигается измельчением более крупных кусков на дробилках, в том числе и одновалковых.

Повышение дробильных производительности агрегатов, работающих в составе дробильно-сортировочных комплексов, задачей. Материалы, актуальной поступающие является дробление, как правило, отличаются значительными колебаниями физико-механических свойств, поэтому основное требование к управлению процессом дробления заключается в поддержании заданной крупности конечного продукта, В максимальном использовании подводимой дробильным К агрегатам дробильно-сортировочный Так электроэнергии. как процесс является непрерывным, остановка одного элемента неизбежно приводит к остановке всего комплекса.

Аварийный выход из строя одновалковой дробилки может быть вызван попаданием недробимого тела в камеру дробления. Для предотвращения подобных аварий, приводящих к длительной остановке дробилки, используют различные предохранительные устройства. Возможно применение распорных плит с ослабленным сечением, но такое техническое решение не является достаточно

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

надежным, так как распорные плиты часто ломаются без видимых перегрузок, а не только при попадании недробимых тел в камеру дробления. Несовершенство распорных плит явилось причиной разработки предохранительных устройств неразрушающегося типа [1], например, пружинных.

Также для повышения надежности дробильного агрегата используются системы контроля на базе анализа основных параметров электропривода [2], которые являются эффективными для определения параметров состояния электродвигателя, но не позволяют судить о состоянии агрегата в целом, в том числе его механической части.

Для решения задачи повышения надежности и оперативности управления дробильным агрегатом разработана система комбинированного автоматического контроля параметров его состояния совместно с системой параметрического управления электроприводом.

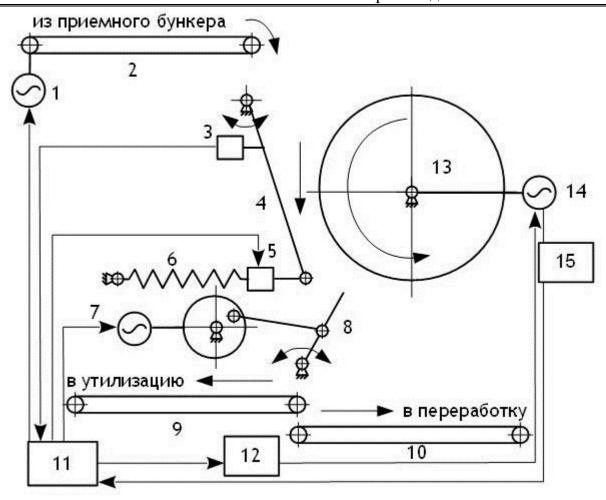
Рассматриваемый управляемый объект (в данном случае валковая дробилка) описывается следующим набором переменных:

- 1. входные управляющие параметры (частота тока и состояние размыкателя щеки от пружинного предохранителя);
- 2. входной возмущающий параметр (прочность дробимого материала);
- з. выходные параметры (сила тока и угол отклонения щеки).

Система аварийного управления работой дробильного агрегата (рисунок 1) функционирует следующим образом. Из приемного бункера по питателю 2 сырье попадает в дробилку. В дробилке осуществляется измельчение материала сжатием валка 13 и щеки 4. Переработанный материал по направляющей 8 поступает на конвейер 10 для дальнейшей транспортировки.

При попадании в дробилку материала с прочностью, превышающую расчетную, возрастает усилие, развиваемое валком. Увеличение усилия характеризуется повышением тока в приводе валка 14. Оценка токового сигнала производится по формуле потребляемой электрической мощности  $(P_{\text{эл}})$ .

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов



- 1 привод питателя; 2 питатель; 3 датчик положения щеки;
- 4 щека; 5 фиксирующее устройство; 6 предохранительное устройство; 7 привод направляющей; 8 направляющая;
- 9 конвейер «в утилизацию»; 10 конвейер «в переработку»;
  - 11 контроллер; 12 частотный преобразователь;
  - 13 валок; 14 привод дробилки; 15 датчик тока

Рисунок 1 – Принципиальная схема дробильной установки с совместной оценкой состояния

Вследствие жесткой кинематической связи между этими компонентами можно считать механическую мощность ( $P_{\text{мех}}$ ), производимую электродвигателем, равной мощности потребляемой дробилкой.

$$3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos\varphi = M \cdot \omega. \tag{1}$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Известно [3], что скорость вращения вала электродвигателя  $(\omega)$  пропорциональна частоте электрического тока. При использовании частотных преобразователей частота тока является известной величиной, то есть скорость вращения вала также известна.

Таким образом, принимая напряжение сети неизменным, а угловую скорость известной, имеем, что ток нагрузки двигателя функционально зависим от момента на валу [4]:

$$I_{\phi} = f(M) \tag{2}$$

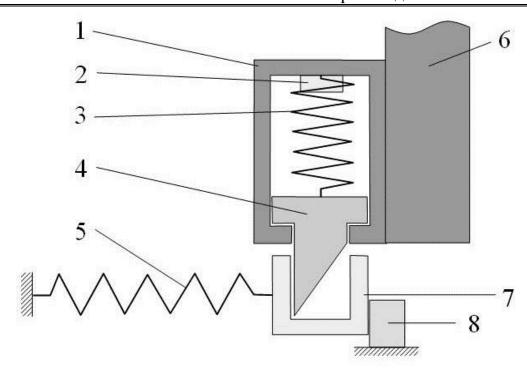
Сигнал об отклонении значения тока отправляется на контроллер 11, который с помощью преобразователя частоты 12 изменяет частоту тока на приводе дробилки 14 для увеличения усилия дробления, при этом останавливая привод подачи материала 1. В этом случае возможно измельчение материала с повышенной прочностью, превышающей расчетную.

Если материал не разрушается под действием этого усилия, оно передается на щеку. Вследствие наличия предохранительного устройства 6, щека начинает отклоняться от исходного положения, что фиксируется датчиком положения 3 [5].

Сигнал об отклонении отправляется на контроллер 11, который с помощью преобразователя частоты 12 изменяет частоту тока на приводе дробилки 14 для увеличения усилия дробления, при этом останавливая привод подачи материала 1. В этом случае возможно измельчение материала с повышенной прочностью, превышающей расчетную.

В случае, если прочность дробимого материала окажется больше значения повышенной прочности, возникает заклинивание, то есть кусок материала фиксируется в зоне разрушения дробилки. куска заклинивании щека отклоняется исходного положения. При фиксации отклонения щеки контроллер запускает изменения направляющей 7. После направляющей 8 подается сигнал на фиксирующее устройство 5. В результате ослабляется зажатие куска и он по направляющей попадает на конвейер в утилизацию 9.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов



1 – корпус фиксирующего устройства; 2 – электромагнит; 3 – пружина;

4 – фиксатор; 5 – пружина; 6 – щека; 7 – паз; 8 – упор

Рисунок 2 – Принципиальная схема фиксирующего устройства.

Фиксирующее устройство работает следующим образом (рисунок 2): при попадании недробимого тела в зону разрушения, щека отклоняется от исходного положения, что фиксируется датчиком угла поворота, направляющим сигнал контроллеру, который формирует сигнал, направленный на включение электромагнита.

При получении сигнала OT контроллера включается электромагнит 2, приводящий в движение фиксатор 4, который кинематическую СВЯЗЬ между щекой устройством, предохранительным ЧТО уменьшает зажатие недробимого тела, позволяя ему покинуть камеру разрушения при вращении валка.

После удаления из камеры дробления недробимого тела электромагнит отключается и фиксатор под действием пружины 3 возвращается в исходное положение. При этом момент, развивающийся под собственным весом щеки, возвращает ее в

## исходное положение.

После удаления недробимого тела из рабочей камеры, щека возвращается в рабочее положение и дробилка продолжает работать в номинальном режиме.

**Выводы.** Разработан способ совместной оценки параметров механической и электрической частей дробильного агрегата, что позволяет использовать комбинированное управление объектом по совместному анализу измеряемых сигналов с целью распознавания характерных информативных сигналов, описывающих предаварийное или аварийное состояние объекта.

### Библиографический список

- 1. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет особенности эксплуатации М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
- 2. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей // Новости электротехники. 2005.№1. С. 54-61.
- 3. Ильинский Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.
- 4. Макаров А. В., Тагильцев-Галета К. В. Анализ работы предохранительных устройств дробильных машин / А. В. Макаров, К. В. Тагильцев-Галета // Известия вузов. Черная металлургия. №6, 2014
- 5. Никитин А.Г., Тагильцев-Галета К.В. Математическая модель определения положения недробимого куска в камере разрушения дробилки со сложным движением щеки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. №8. С. 34-36.

УДК 621.397.48: 62-851.8

## ПЕРЧАТКА – КОНТРОЛЛЕР С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

## И. В. Присяжнюк, Д.Е. Модзелевский

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

В статье рассматривается принцип работы перчатки – контроллера с обратной связью, делается расчёт пневмопривода, предлагается использование технологии оптического трекинга на основе нейросетевого распознавания жестов.

Ключевые слова: контроллер с обратной связью, распознавание жестов, оптический трекинг, пневмопривод, формула Лапласа.

Разработка устройств-контроллеров для взаимодействия с виртуальным окружением является одной составляющий средств реализации виртуальной реальности, активно развивающихся в настоящее время. Средства взаимодействия пользователя за счет тактильных ощущений позволяют увеличить глубину погружения в виртуальную реальность и усиливают эффективность ее применения.

Перчатка-контроллер собой представляет систему, позволяющую на основании данных отслеживания жестов и положения руки управлять виртуальной проекцией руки или других виртуальных указателей, а также обеспечивает обратную механическую связь при взаимодействии тактильную и виртуальными объектами. Данная технология находит применение в сфере развлечения, обучения, космонавтики, в системах умного дома, как средство ввода информации [1,2]. Функциональная схема рассматриваемого в статье контроллера представлена на рисунке 1.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

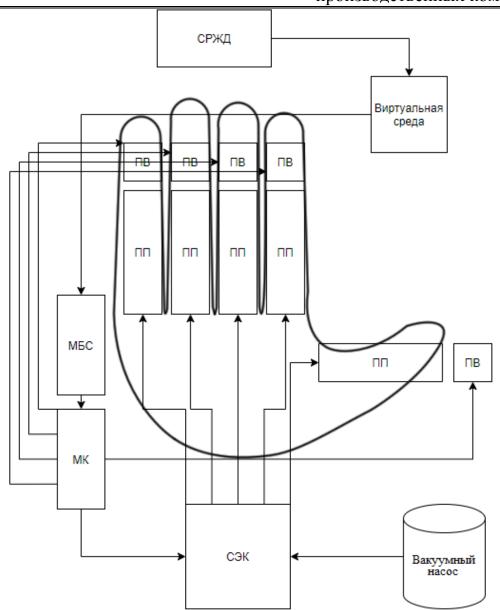


Рисунок 1 – Функциональная схема перчатки-контроллера

На рисунке 1 приняты следующие условные обозначения: СРЖД — система распознавания жестов и движений; ПВ — пьезоэлектрический вибратор; ПП — пневматический привод; МБС — модуль беспроводной связи; МК — микроконтроллер; СЭК — система электрических клапанов.

Приведенная на рисунке 1 схема работает в соответствии с следующим алгоритмом:

1) Система распознавания жестов и движений определяет текущее положение руки в целом, и пальцев в частности, полученные данные используются для построения трёхмерной

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

(далее 3D) проекции руки или другого виртуального контроллера в виртуальной среде;

- 2) При перемещении руки или пальца(цев) их 3D проекция случае переместится В виртуальной среде, проекции 3D объектом, столкновения другим система жестов и движений передаст массив распознавания (количество соприкосновений, длительность, характер) на модуль беспроводной связи при помощи технологии bluetooth;
- 3) Микроконтроллер на основании полученного массива вибратор(ы) пьезоэлектрический подает сигнал на данных закрепленные на соответствующих месту контакта 3D проекции с 3D объектом, части a также подает руки, импульс соответствующие электрический клапаны;
- 4) При подаче сигнала на электрический клапаны они переходят в открытое состояние, благодаря чему из соответствующих пневматических приводов откачивается воздух приводя их в движение и создавая обратную связь;
- 5) В случае если рука и её 3D проекция прекратит движение в направлении объекта, клапан вакуумопровода будет закрыт, прекратив движение пневматического привода;
- 6) Если контакт 3D проекции руки и 3D объекта будет прекращен, будет подан сигнал на клапан для переключения его в режим поступления воздуха, что сделает возможным обратное движение пневматического привода.

Система распознавания жестов и движений основана на совмещении трёх подходов для обеспечения наибольшей точности работы:

- 1) На основании изображения, получаемого от камеры, система создаёт ограничивающую рамку руки обрезая получаемое изображение;
- 2) Обрезанное изображение передаётся в нейросеть для распознавания ключевых 3D точек руки, на основании возвращенных данных 3D проекции присваиваются соответствующие характеристики;
- 3) На основании меток-маркеров производятся дополнительные уточнения позиции руки в позах, при которых

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

точность распознавания нейросетью существенно снижается (самоокклюзии двух рук, сочлененные пальцы и т.д.)

Использование точно обрезанного изображения позволяет снизить массив данных необходимых для обработки нейросетью [3], также для снижения ошибок распознавания рекомендуется использовать высококонтрастный цвет материала перчатки. Использование всех этих методов в совокупности позволяет добиться средней точности обнаружения ладоней около 96% и среднее ошибок регрессии размера ладони 13%.

Возможны два варианта программной реализации системы распознавания жестов и движений:

- 1) Приложение на движке Unity 3D с модулем распознавания движений устанавливается на соответствующее (персональный компьютер, смартфон и т.д.), при устройство помощи камеры устройства модуль получает изображение и обрезает его по ограничивающей рамке, после чего обработанное изображение передаётся на программу-сервер с нейросетью, которая возвращает ключевые 3D точки, после чего модуль строит 3D проекцию при необходимости отправляет данные И столкновениях микроконтроллер при помощи на Bluetooth;
- 2) Standalone приложение, получающее, обрабатывающее и распознающее изображение с камеры, после чего полученные ключевые 3D точки передаются в 3D приложение как данные с физического контроллера, в случае если приложение позволяет использование контроллеров с обратной связью, то получаемая информация обрабатывается соответствии c спецификой В приложения, обработанный конкретного И массив данных передается на контроллер.

Для осуществления обратной связи используется пневмопривод. Контроль над отдельным пневмоприводом осуществляется при помощи сдвоенных электрических клапанов, представленных на рисунках 2 и 3.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

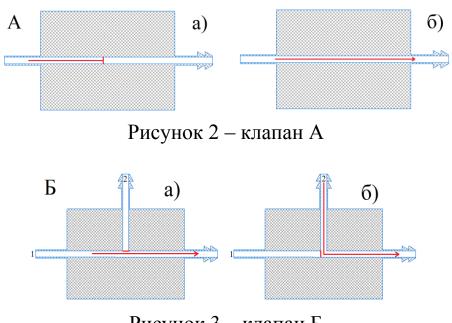


Рисунок 3 – клапан Б

Согласно экспериментальным данным, рассматриваемый пневмопривод способен поднять объект весом в 3кг в течение 0,2 секунды при использовании вакуума -80 кПа [4]. Для обеспечения бесперебойного функционирования возможен выбор электропневматических клапанов серии КПУ-Л [5].

Вот возможные варианты типичных режимов работы сдвоенных электрических клапанов:

- 1) Столкновение отсутствует: клапан A закрыт, клапан Б находится в состоянии «а»;
- 2) Произошло столкновение, проекция руки продолжает движение в направлении 3D объекта: клапан A открыт, клапан Б находится в состоянии «а»;
- 3) Столкновение произошло, но движение проекции руки в направлении 3D объекта прекратилось: клапан A закрыт, клапан Б находится в состоянии «а»;
- 4)После столкновения проекция руки удаляется от 3D объекта: клапан A закрыт, клапан Б находится в состоянии «б».

Пневматический привод представляет из себя вакуумный пакет, складываемый гармошкой и вложенный в него сжимаемый каркас. Вакуумный пакет имеет отверстие для соединения его с системой электрических клапанов при помощи вакуумопровода. Изображение пневмопривода в действии представлено на рисунке

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

4. Упрощенная механическая модель пневмопривода предоставлена на рисунке 5.



Рисунок 4 – Изображение пневмопривода в действии

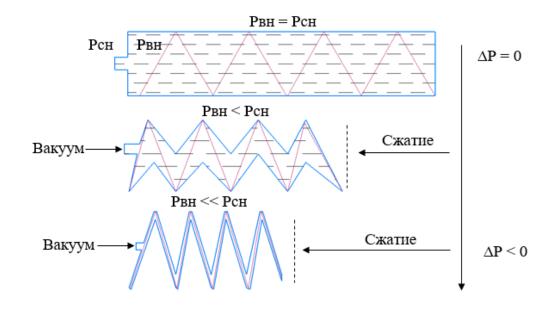


Рисунок 5 – Механическая модель пневмопривода

Ha представленной рисунке 5 В модели сжимаемый внутренний каркас абстрагируется как пружина сжатия, пакет безмассовая, моделируется как гибкая, не растягивающаяся мембрана. Если внутреннее давление ниже, чем давление снаружи , то мембрана будет деформироваться вовнутрь, обжимая каркас и заставляя его сжиматься. Выходная сила равняется сумме горизонтальных сил натяжения  $T_x$  от мембраны и движущей силы сжатия каркаса под действием вакуума возникающей на площади

поперечного сечения привода, когда существует разность давлений  $\Delta P$ 

$$F_{\text{gbix}} = 2T_{x} + F_{\text{gak}} . {1}$$

Сила  $F_{\text{вак}}$  в этой модели рассчитывается как

$$F_{\text{BAK}} = P \times A = PHW, \qquad (2)$$

где A — площадь поперечного сечения привода, а W и H — ширина и высота привода. Сила  $T_x$  является горизонтальной частью силы натяжения мембраны привода T, её можно рассчитать следующим образом

$$T_{x} = T\cos\beta. \tag{3}$$

Сила натяжения T может быть оценена на основе закона Лапласа следующим образом

$$T = P \times R \times W, \tag{4}$$

и её угол к горизонтальному направлению равен

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{L}{R}\right),\tag{5}$$

где R — радиус кривизны обшивки в точке контакта, L — длина привода соответственно [4].

Рассматриваемый В статье продукт имеет ряд технологических преимуществ по сравнению с имеющимися на рынке аналогичными изделиями. Так использование пневмоприводов вместо механических приводов, позволяет перенести основную часть весовой нагрузки с предплечья, на подставку, тем самым облегчая движения пользователя и уменьшая его усталость во время использования контроллера. Использование оптического трекинга вместо магнитного, радиочастотного или инерциального, позволяет избежать затрат на приобретение системы трекинга и уменьшает общую массу изделия.

## Библиографический список

- 1. От перчаток для NASA до виртуальных игр: все о компании Sfera.one // newslab.ru URL: https://newslab.ru/article/856731 (дата обращения: 14.11.2020).
- 2. Системы виртуальной, дополненной и смешанной реальности / А.А. Смолин, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, А.В.

Меженин, В.А. Богатырев, СПб.: Университет ИТМО, 2018. – С. 32.

- 3. On-Device, Real-Time Hand Tracking with MediaPipe [Электронный ресурс] // Google AI Blog: официальный блог. URL: https://ai.googleblog.com/2019/08/on-device-real-time-hand-tracking-with.html (дата обращения: 10.11.2020)
- 4. Shuguang Li, Daniel M. Vogt, Daniela Rus, and Robert J. Wood (2017) SI Appendix for Fluid-driven origami-inspired artificial muscles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114(50). C. 3, 4, 8.
- 5. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин, А.Б. Цейтлин и др.; под ред. К.Е. Демихов. 3-е изд., переработанное и дополненное. М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 2009. С. 180.

## УДК621.317.38

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

## С. Ю. Романюк, Е. С. Кузнецова, В. А. Кузнецов Сибирский государственный индустриальный университет г. Новокузнецк

Аннотация: Выполнен анализ существующих методов расчета энергозатрат, используемых формирования программы ДЛЯ энергосбережения металлургическом предприятии. Рассмотрен на предлагаемый запатентованный способ совершенствования имеющихся систем учета электроэнергии.

Ключевые слова: электроэнергия, энергосбережение, условно-переменные, условно-постоянные, расходы, методика.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

электропотребления Рост объемов электротехническим эффективности комплексом повышает требования к проблеме отражает оборудования эксплуатации И необходимость формирования энергосбережения программ энергоэффективности. Подтверждением актуальности проблемы является такой нормативно-правовой документ, как №261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23.11.2009 г., в соответствии с которым все предприятия Российской Федерации должны в полной мере экономией энергоресурсов, заниматься оптимизировать производственные процессы и рабочие режимы оборудования и повседневную работу с коллективами, установок, проводить направленную на энергосбережение.

Затраты энергоресурсов в металлургической отрасли России намного превышают электропотребление ведущих зарубежных Значительная производителей энергоёмкость металла. производства, изношенный технологического парк предприятий, энергетического оборудования производств, постоянный рост тарифов на поставки угля, природного газа и электроэнергии диктуют необходимость существенных преобразований структуре технологии производства В И максимального снижения потребления энергоресурсов. Решение проблем экономической стабильности актуальных предприятий, конкурентоспособности металлургических энергобезопасности продукции требуют существенного эффективности повышения использования топливноэнергетических ресурсов (ТЭР), реализации энергосберегающих собственной энергетической технологий, развития базы И улучшения экологической обстановки.

Для решения вышеуказанной проблемы необходимы методики и средства, позволяющие с достаточной точностью проводить измерения электрических параметров оборудования с целью их дальнейшей систематизации и оптимизации.

В Политиках руководства металлургических предприятий [1] определяются общие подходы к правовому, организационному и финансово-экономическому регулированию производственной деятельность комбината в области энергосбережения,

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

обеспечивающего достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдение требований к охране окружающей среды.

Энергосбережение на предприятии обеспечивается при этом эффективности использования энергетических повышением вторичных энергетических ресурсов В каждом ресурсов процессе рассматривается, технологическом И самостоятельный крупный дополнительного И источник энергоснабжения.

Основными принципами энергосберегающей политики металлургического предприятия являются:

- производство необходимого количества энергетических ресурсов с минимальными затратами в нужном качестве;
- -полная утилизация и эффективное использование вторичных энергетических ресурсов;
- -максимальное развитие собственных энергетических мощностей по выработке электроэнергии.

Основные направления энергосбережения приведены ниже:

- -создание и развитие центра энергосберегающих технологий;
- -оснащение приборами контроля, учета и управления всех энергетических ресурсов на всех потоках;
- -создание и развитие энергобаланса, разработка и внедрение стимулирующих норм и лимитов;
- -создание и развитие комплексов для управления и оптимизации энергопотоков с созданием единого энергоцентра предприятия;
- разработка прогнозных моделей и оптимизация энергопотребления;
- -мотивация персонала на эффективное использование энергетических ресурсов;
- -энергетический аудит цехов и производств, анализ производства и потребления энергоресурсов.

Политику энергосбережения во всех подразделениях предприятия необходимо объяснять так, чтобы работник любого уровня понимал ее значение применительно к рабочему месту.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

В изменяющихся условиях металлургического производства планировании расчётах И энергозатрат при необходимость учитывать эти изменения, что возможно только с помощью методов, отражающих конкретные условия особенности эксплуатации оборудования. Потребление энергоресурсов в металлургической промышленности зависит от производственных технологических И большинство которых в настоящее время не учитывается при анализе, планировании и управлении на всех уровнях. приводит к тому, что на практике программа энергосбережения является недостаточно объективной и слабо связана со спецификой и производственной программой предприятия, производства и теми изменениями, которые происходят в процессе её выполнения.

В настоящее время для определения расхода электроэнергии относятся следующие методы[4]:

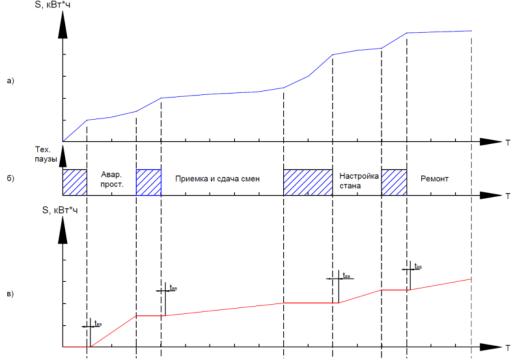
- аналитический,
- опытно-экспериментальный,
- расчетно-статистический,
- смешанный.

наибольшее При ЭТОМ применение нашли расчетностатистические методы, недостатками которых являются сложность и низкая точность разделения расходов электроэнергии на условно-постоянные и условно-переменные. В то же время, такое разделение очень важно, так как ответственность за условнопеременные расходы чаще всего должна ложиться (электротехнологический) персонал, технологический формирует идеологию производства, а также непосредственно реализует технологические режимы работы технологического оборудования. Ответственность за условно-постоянные расходы нести ответственный за электрохозяйство энергетик) предприятия, так как именно он формирует идеологию работы вспомогательного оборудования (вентиляторы, системы воздухо- и водоснабжения), а также основных электрические вспомогательные производства (ЦСиП, ЭРЦ, цех водоснабжения и др).[2]

Для получения достоверной информации об условно-постоянных и условно-переменных расходах, на основе которой

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

будут сформированы программы энергосбережения, в СибГИУ разработан и получен патент на новый способ определения расходов электроэнергии. [3] Сущность предлагаемого решения заключается в том, что целью повышения точности определения величин условно-постоянных и условно-переменных расходов в расчетно-статистических методах используется способ опытного измерения) определения (постоянного указанных который заключается в том, что условно-постоянные расходы электроэнергии фиксируются системой учета электроэнергии (СУЭ) в моменты времени, когда производство прекращается (простой) и отсутствует п-ое количество часов, а условнопеременные расходы электроэнергии записываются системой производственное подразделение когда производит продукцию (работа) за период m часов. При этом сумма (n + m) является общим временем цикла наблюдения, за который на данном производстве анализируются расход электроэнергии, а общий расход электроэнергии за период наблюдения составляет условно-постоянных условно-переменных И (рисунок 1).



а – процесс работы производственного подразделения, б – период технологических пауз, в – система учета, фиксирующая условно-постоянные расходы

Рисунок 1 – Процесс работы производственного подразделения

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Для определения условно-постоянных расходов в схемы учета установлено устройство, которое учитывает расход электроэнергии только в технологические паузы. Нормируемые технологические паузы формируется, например, из-за циклической выдачи металла из нагревательных печей в прокатном производстве, или в процессе завалки, подвалки, взятия проб при плавке металла в электросталеплавильном цехе и т.д.

Предлагаемый способ разрабатывался с учетом «последовательной» технологии на примере рельсобалочного цеха промышленного предприятия, когда выход из строя или остановка одного из механизма технологической цепочки, приведет к простою всего производственного процесса. Также данный способ применим, например, и для прокатного производства.

Несмотря TO, ЧТО способ разрабатывался на «последовательной» технологии, при более тщательной разработке алгоритма учета и разделения расходов затрат, данный способ любого промышленного применим ДЛЯ подразделения предлагаемый способ предприятия, делая универсальным энергосбережения при формировании программ И повышении энергоэффективности промышленных предприятиях.

#### Список использованных источников

- 1. Организация энергосбережения (энергоменеджмент). Решения ЗСМК-НКМК-НТМК-ЕВРАЗ: Учеб. пособие [Текст] / Под ред. В.В. Кондратьева. М.: ИНФРА-М, 2011. 108 с. Управление производством.
- 2. Романюк С.Ю. Энергосбережение с использованием условно-переменных и условно-постоянных расходов электроэнергии [Текст] / С.Ю. Романюк, Е.С. Кузнецова, В.А. Кузнецов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. Труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции. Сибирский государственный индустриальный университет. 2016. С. 253-259.
- 3. Способ измерения и учета расхода электроэнергии на производстве и устройство для его осуществления: пат. 2699925 Рос. Федерация: МПК G01R 21/06, G01R 21/133 / Кузнецов В.А.,

Кузнецова Е.С., Романюк С.Ю., Громов В.Е., Кузьмин С.А. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «СибГИУ» — № 2018142905; заявл. 04.12.18; опубл. 11.09.19, Бюл. № 26. — 11 с.

4. Романюк С.Ю. Совершенствование системы учета расхода электроэнергии на промышленном предприятии [Текст] С.Ю. Романюк, Е.С. Кузнецова, В.А. Кузнецов, С.А. Кузьмин // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. ред. М.В. Темлянцева. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2018. - Вып. 22. - Ч. III. Технические науки. – 392 с. С. – 157-162.

## УДК 681.51

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АГРЕГАТАМИ НА ПРИМЕРЕ УГЛЕОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ

## <sup>1</sup>А.С. Саламатин, <sup>1</sup>Г.В. Макаров, <sup>2</sup>М.М. Свинцов

1 - Общество с ограниченной ответственностью «Научноисследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк; 2 - Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Предложен новый подход разработки программного обеспечения для систем управления агрегатами, который был использован в рамках строительства ОФ «Шахта 12». В основе метода лежит применение типовых решений для автоматизации технологических объектов.

Ключевые слова: автоматизация, углеобогатительная фабрика, типовые решения, программируемый логический контроллер, Omron.

Для централизованного контроля и управления технологическим комплексом — подсистемы, ответственные за управление локальными агрегатами, объединяют в систему управления технологическим комплексом, работа с которой

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

обеспечивает оператору АСУ ТП возможность своевременного доступа к необходимой информации и облегчает передачу управляющих команд.

Одним из ключевых элементов управляющих систем являются программируемые логические контроллеры. Разработка программ для программируемых логических контроллеров (ПЛК), не зависимо от типа производства, заключается в создании множества систем логического управления для каждого агрегата, входящего в технологическую цепочку.

Так, при формировании признаков «Неготовность» и «Авария» зачастую может быть использовано более 10 логических переменных. Тогда, при необходимости исправить несколько из них, на внесение исправлений для каждого агрегата уйдет много времени. Это особенно критично в уже функционирующем объекте, когда останавливать процесс нельзя, а ошибку надо исправить в как можно более сжатые сроки [1].

Для больших объектов, включающих в свой состав множество технологических агрегатов, разработка такого рода систем занимает много времени. Далее, в процессе пусконаладочных работ и первых запусков выявляются ошибки и изменения, которые затрагивают каждый агрегат. Их устранение так же занимает большое количество времени, особенно когда количество таких агрегатов достигает нескольких десятков или сотен.

Чтобы устранить ЭТИ недостатки, технологическое (конвейеры, оборудование насосы, дробилки И т.д.) можно представить в виде типовых структур - это приведет не только к снижению времени создание на систем, НО И разработчику таких систем ограничить штат и квалификацию исполнителей [1].

Многие агрегаты, даже выполняющие различные технологические функции, имеют принципиально одинаковое действие, основанное на типе исполнительных органов [2].

Был рассмотрен ряд углеобогатительных фабрик. Все они имеют схожую технологическую структуру и набор используемых агрегатов: насосы, конвейеры, вентиляторы, грохоты, дробилки, питатели, пробоотбиратели, проборазделочные машины, шиберные и поворотные задвижки. В зависимости от исполнения эти

агрегаты бывают с устройством защиты двигателя, устройством плавного пуска или частотным преобразователем.

На основании принципиальных электрических схем можно выделить следующую типовую классификацию этих агрегатов, имеющих однотипные структуры.

- 1. Агрегаты без специальных устройств (некоторые виды насосов, магнитных сепараторов)
- 2. Агрегаты с устройствами плавного пуска (некоторые виды конвейеров, насосов).
- 3. Агрегаты с частотным преобразователем (некоторые виды конвейеров, насосов, вентиляторов).
- 4. Одноприводные агрегаты с устройством защиты двигателя (некоторые виды насосов, грохотов, элеваторные колеса и гребковые механизмы тяжелосредных сепараторов).
- 5. Двухприводные агрегаты с устройствами защиты двигателя (некоторые виды грохотов и дробилок).
- 6. Задвижки без позиционера.
- 7. Задвижки с позиционером.

С учётом разработки типовых решений процесс создания системы управления промышленного технологического комплекса может быть представлен в виде следующей структуры, представленной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структура процесса создания системы управления промышленного технологического комплекса

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Во время пуско-наладочных работ при строительстве ОФ «Шахта 12» для программной реализации части агрегатов был использован предложенный метод.

В качестве базового ПО был выбран СХ-Опе — единая среда программирования для программируемых логических контроллеров (ПЛК) фирмы Отпоп. Данное ПО отличается возможностью использовать блоки данных, состоящие из данных одного типа (массивы данных) или различных типов (структуры данных) [2].

Пример структуры данных, общей для разных видов задвижек без позиционера, состоящей из входных и выходных сигналов, команд признаков, представлен на рисунке 2.

<b>₫</b> valve1_str			Задвижка (2 выхода)		
` s_sf	BOOL		Защитная автоматика (-101)		
` s_op	BOOL		Задвижка открыта (-102)		
` s_cl	BOOL		Задвижка закрыта (-103)		
, s_sp_ob	BOOL		Контроль кнопки «Открыть» (-104)		
` s_sb_cl	BOOL		Контроль кнопки «Закрыть» (-105)		
<ul> <li>F_SF</li> </ul>	BOOL		Нет напряжения в цепях управления (сработала		
· F_NMV	BOOL		Нет движения задвижки		
<ul><li>F_NOP</li></ul>	BOOL		Задвижка не открылась		
' F_NCL	BOOL		Задвижка не закрылась		
<ul> <li>F_F991</li> </ul>	BOOL		Блокировка		
· F_F99	BOOL		Блокировка		
` F_OP	BOOL		Задвижка открыта		
` F_CL	BOOL		Задвижка закрыта		
· F_RM	BOOL		Режим управления «Местный»		
` F_RD	BOOL		Режим управления «Дистанция»		
• F_RDB	BOOL		Режим управления «Дистанция с блокировками»		
` F_RA	BOOL		Режим управления «Автомат»		
· F_NP	BOOL		Нет крайнего положения задвижки		
<ul> <li>F_F141</li> </ul>	BOOL		Состояние «Открытие»		
· F_F142	BOOL		Состояние «Закрытие»		
• F_ROUT	BOOL		Агрегат выведен из цепочки		
' F_REG	BOOL		Включено автоматическое регулирование		
<ul> <li>F_F13</li> </ul>	BOOL		Состояние агрегата «Неготовность»		
• F_F16	BOOL		Состояние агрегата «Авария»		
, n <sup>ob</sup>	BOOL		Сигнал на открытие задвижки (-91)		
` u_cl	BOOL		Сигнал на закрытие задвижки (-92)		
· CO_OP	BOOL		Внутренняя команда "Открыть"		
· CO_CL	BOOL		Внутренняя команда "Закрыть"		
· RM_CO	BOOL		Команда оператора "Местный режим"		
· RD_CO	BOOL		Команда оператора "Дистанционный режим"		
· RDB_CO	BOOL		Команда оператора "Дистанция с блокировками"		
· RA_CO	BOOL		Команда оператора "Автоматический режим"		
· OP_CO	BOOL		Команда оператора "Открыть"		
· CL_CO	BOOL		Команда оператора "Закрыть"		
· ROUT_CO	BOOL		Команда оператора "Выключена"		
¥≕ F_RU	INT		Режим управления		
<b>-</b> ⊺	WORD	[3]	Таймеры		

Рисунок 2 – Структура данных для задвижек без позиционера

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

На основе структуры данных, представленной на рисунке 2, разработан общий функциональный блок, описывающий алгоритм управления агрегатами.

Общий функциональный блок позволяет представить программу управления агрегатами в виде набора его экземпляров, входными и выходными переменными которых являются соответствующие экземпляры общей структуры данных.

Осуществлено сравнение на внесение корректировок традиционным и новым методом, что представлено на рисунке 3.

## Суммарное время корректировок

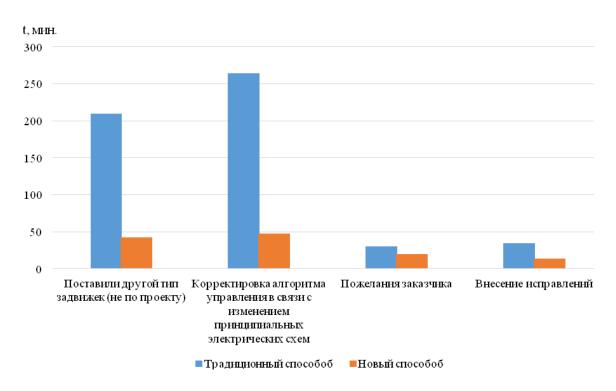


Рисунок 3 — Сравнение времени на внесение корректировок традиционным и новым метод

Среднее время на внесение одной корректировки для традиционного и предлагаемого способа одинаково, однако новый способ позволяет вносить изменения не в каждую программную реализацию однотипных агрегатов, а в используемые

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

функциональные блоки, что позволяет сократить время внесения изменений при большом количестве однотипных агрегатов.

Одной из ключевых проблем при пусконаладочных работах считается нежелание заказчика отклоняться от существующих производственных планов и проводить полноценные плановопредупредительные работы, требуемые для поиска и устранения ошибок [3]. Так, необходимость в большей части исправлений была обусловлена возникшими при строительстве отклонениями от проектной документации, а также изменениями в принципиальных схемах агрегатов. Круговая диаграмма, демонстрирующая соотношение всех причин, приведена на рисунке 4.

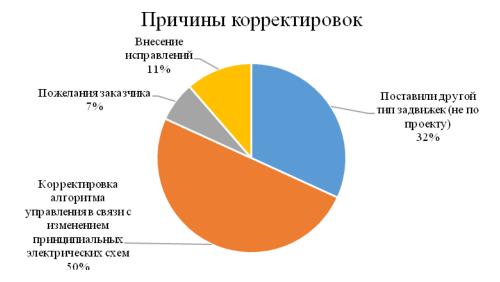


Рисунок 4 – Распределение времени на внесение изменений от количества типовых агрегатов

изменений внесения в код программы, созданной способом, необходимо традиционным совершить идентичные действия подпрограмм ДЛЯ логического управления В предложенный агрегата. свою очередь, используя достаточно внести изменения лишь один раз в функциональный В независимости otтиповых агрегатов. количества внесение изменений следствии этого время на относительно метода сокращается пропорционально количеству однотипных агрегатов.

Использование функциональных блоков также оправдывает себя при формировании типовых контуров регулирования.

Также реализованы функциональные блоки, реализующие регулирование для типовых контуров. Пример такого функционального блока представлен на рисунке 5. Он применен для регулирования уровня во всех приямках, отличие заключается только в уставках.

2	50	Регулирование уровня приямков для насоса поз. 346							
	00			reg_le	ev_fb	*			
				reg_	lev				
		Р_On Флаг «Всегда	•	(BOOL) EN	(BOOL) ENO				
		- Train #Boorga	LEV346_VAL Уровень в п	(INT) LEV	(INT) ARZFR	N346_ARZFR Текущая зад			
			N346_LEV Уставка мин	(INT) LEV_MIN_CO —	LEV_MIN_CO	* N346_LEV * Уставка мин			
			N346_LEV Уставка мак	(INT) LEV_MAX_CO_	_LEV_MAX_CO	N346_LEV Уставка мак			
			N346_FRQ Уставка мин	(INT) FRQ_MIN_CO_	FRQ_MIN_CO	* N346_FRQ * Уставка мин			
			N346_FRQ Уставка мак	(INT) FRQ_MAX_C _ O	_FRQ_MAX_C O	N346_FRQ Уставка мак			

Рисунок 5 — Функциональный блок для регулирования уровня приямков

Разработанные функциональные блоки как для управления технологическими агрегатами, так И типовыми контурами регулирования могут быть применены и для других обогатительных фабрик, автоматизированные где управления базируются на ПЛК фирмы Omron. Так как данные разработки реализованы стандартизированных языках могут быть преобразованы программирования, то они множества базовых программных средств других производителей ПЛК.

#### Список использованных источников

1. Макаров Г. В. Типовые автоматизированные технологические комплексы как элементы промышленных производств / Г.В. Макаров, М.В. Раскин, А.С. Саламатин, Е.Н.

Сидорович // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Новокузнецк. - 2016. - С. 201-202.

- 2. Саламатин А.С. Эффективность типизации программных модулей для управления технологическими агрегатами на примере углеобогатительной фабрики / А.С. Саламатин, Л.П. Мышляев, Г.В. Макаров, М.В. Ляховец, В.С. Сергеев // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды восьмой Всероссийской научно-практической конференции, 20-21 ноября 2018 г. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2018. С. 78–84
- Типовые 3. Макаров Γ. В. автоматизированные технологические комплексы как элементы промышленных производств / Г.В. Макаров, М.В. Раскин, А.С. Саламатин, Е.Н. Сидорович // Системы автоматизации в образовании, науке и Труды всеросийской научно-практической производстве. конференции с международным участием. - Новокузнецк. - 2019. -C. 55-57.

УДК 004.942:622.268

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ПЕРЕДОВЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

## В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» г. Новокузнецк

Разработана методика исследования геомеханических процессов в окрестности передовых выработок при отработке угольных пластов длинными комплексно-механизированными забоями. Предложена система управления эксплуатационной устойчивостью выработок на стадиях их проведения, пересечения очистным забоем и ликвидации при демонтаже оборудования.

Ключевые слова: передовая выработка, демонтажная камера, система управления, эксплуатационная устойчивость выработок.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Введение. Очистные комплексно-механизированные забои (КМЗ) современных угольных шахт, отрабатывающих пологие пласты средней мощности, оснащаются оборудованием, обеспечивающим добычу угля 20-30 тыс.т в сутки. Однако ритмичная высокопроизводительная работа КМЗ сдерживается проведения ограничениями ПО темпам подготовительных выработок, вспомогательных негативным влиянием фактора при природной метаноносности угольных пластов более 13 м<sup>3</sup>/т, высокой долей ручного труда с применением малой механизации при выполнении монтажно-демонтажных необходимостью предварительного проведения демонтажной камер на границах выемочных столбов. При длине выемочного столба до 4000 м для обеспечения запасных выходов аварийных ситуациях через персонала каждые проводятся и поддерживаются передовые выработки конвейерным разрезных печей между И вентиляционным Расстояние передовыми штреками. между выработками в 2-3 раза сокращается при наличии **УГОЛЬНОМ** В пласте геологических нарушений разрывного типа.

При переходе КМЗ к передовым выработкам в виде разрезных печей и демонтажной камеры возникают сложности их поддержания, так как происходит увеличение напряжений и деформаций в массиве горных пород вследствие наложения дополнительных напряжений и деформаций, возникающих в окрестности передовой выработки и очистного забоя.

Учитывая сложность управления геомеханическими процессами при взаимном влиянии очистных и подготовительных выработок, а также негативном влиянии природных и техногенных факторов геологических нарушений, виде внеплановых остановок КМЗ, динамических проявлений горного давления и внезапных выбросов угля и газа, возникает актуальная научнопрактическая задача управления создания системы геомеханическими процессами при проведении и поддержании выработок впереди очистных забоев угольных шахт.

*Методы исследования*. Объектом исследования является напряжённо-деформированное состояние массива горных пород в

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

окрестности длинного очистного забоя и передовой выработки при отработке пологого угольного пласта.

Приняты следующие исходные данные (в условиях пласта E5 шахты «Осинниковская»), характеризующие объект исследований: мощность пласта 3,00 м, глубина разработки 620-710 м, породы кровли представлены переслаиванием аргиллитов и алевролитов прочностью при сжатии 30-50 МПа, длина лавы 250 м, механизированный комплекс ГЛИНИК-21/45.

Изучались следующие варианты расположения выработок:

- диагональная печь проведена между вентиляционным и конвейерным штреками, на устойчивость пород в печи очистные выработки соседних выемочных столбов влияние не оказывают, то есть печь рассматривается как одиночная выработка.
- диагональная печь проведена между вентиляционным и конвейерным штреками, очистной забой последовательно приближается и пересекает разрезную печь, то есть рассматривается влияние опорного горного давления впереди лавы на устойчивость пород в печи.
- очистной забой приближается к демонтажной камере, которая испытывает не только повышенное горное давление, но и породы в ней должны сохранить устойчивость на весь период демонтажа механизированного комплекса (1-3 месяца).

При разработке алгоритма расчёта параметров напряженнодеформированного состояния геомассива использованы результаты исследований, изложенные в публикациях [1-3].

горноисследований Методика включала анализ участка построение условий геологических шахтного поля, геометрической модели в виде вертикального разреза по линии простирания пласта, проведение вычислительных экспериментов с использованием авторского комплекса программ [4], обсуждение исследований И обоснование рекомендаций результатов обеспечению устойчивости пород окрестности В выработок при пересечении их комплексно-механизированным забоем.

Вычислительные эксперименты состояли из поэтапного расчёта параметров напряжённо-деформированного состояния геомассива [5, 6]:

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

- упругое деформирование горного массива без учёта влияния горных выработок (нетронутый массив);
- упругое деформирование горного массива с учёта влияния всех горных выработок в пределах рассматриваемого вертикального сечения;
- упруго-пластическое деформирование горного массива с учётом влияния всех горных выработок в рассматриваемом вертикальном сечении и процессов предразрушения или разрушения горных пород при величинах напряжений, близких к пределу прочности угля или пород;
- упруго-пластическое деформирование горного массива с учётом влияния всех горных выработок в пределах рассматриваемого вертикального сечения, процессов предразрушения или разрушения горных пород при величинах напряжений, близких к пределу прочности угля или пород, а также процессов ползучести пород или элементов крепи под влиянием периода их эксплуатации.

**Результаты** и их обсуждение. Согласно программе исследований было рассмотрено несколько вариантов взаимного положения передовой выработки и очистного забоя. На рисунке 1 показаны изолинии распределения вертикальных смещений пород в окрестности одиночной передовой выработки (рисунок 1а) и при взаимном влиянии разрезной печи и очистного забоя (рисунок 1б).

На основе анализа результатов вычислительных экспериментов выявлены следующие закономерности:

- относительная конвергенция кровли и почвы выработки увеличивается при приближении очистного забоя от 0,01 до 0,02;
- наиболее опасным участком является сопряжение кровли и левого бока разрезной печи (противоположного от очистного забоя), где площадь разрушенных пород кровли и угольного пласта достигает  $2m^2$ ;
- в кровле и почве одиночной выработки происходит разгрузка пород кровли и почвы, при приближении очистного забоя эта зона увеличивается с формированием концентраторов вертикальных напряжений над и под секциями механизированной крепи.

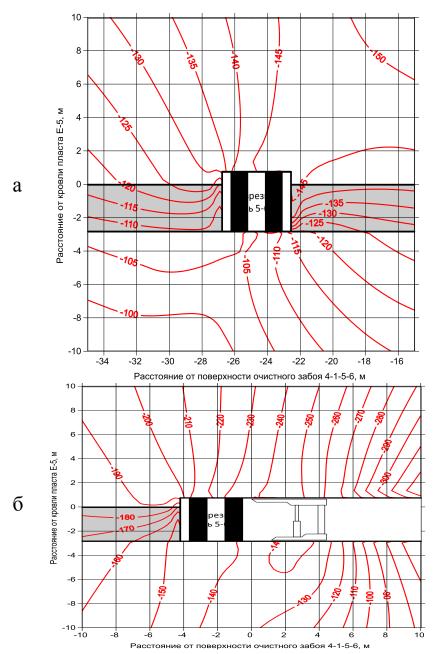


Рисунок 1 - Вертикальные смещения (мм) пласта и вмещающих пород, в окрестности разрезной печи: а - на расстоянии 100 м от очистного забоя; б - при совместном влиянии разрезной печи и очистного выработанного пространства

Полученные результаты исследований были использованы при выборе способа управления горным давлением устойчивостью пород в окрестности передовой выработки, пересекаемой очистным забоем. Было рекомендовано осуществлять полную или частичную закладку поперечного сечения выработки горной

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

угольной массой или специальными видами крепи, разрушаемой очистным комбайном при пересечении выработки.

Наиболее сложная ситуация возникает при подходе очистного забоя к передовой выработке в виде демонтажной камеры, так как она предназначена для демонтажа механизированного комплекса в течение 1-3 месяцев. На рисунке 2 представлены изолинии распределения отношения остаточной прочности угля и пород к исходной прочности. Анализ полученных данных позволил обосновать паспорт анкерного крепления демонтажной камеры при въезде в неё очистного забоя и постепенном сокращении угольного целика между камерой и очистным забоем.

Установлено, что наиболее опасными зонами является краевая часть пласта в боку демонтажной камеры, где площадь зоны разрушения угля и пород кровли достигает  $8m^2$ , что приведёт к формированию зоны отжима разрушенного угля, увеличению ширины камеры и снижению устойчивости пород кровли. Для устранения этого негативного явления предлагается упрочнение краевой части пласта с помощью анкеров и полимерных смол.

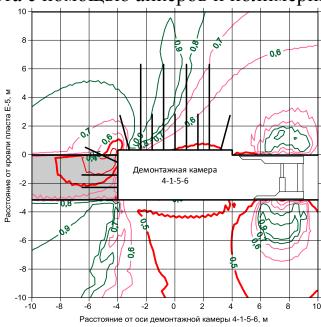


Рисунок 2 - Распределение отношения остаточной прочности угля и пород при въезде очистного забоя в камеру

Породы в кровле и почве камеры находятся в стадии предразрушения, то есть при длительной эксплуатации камеры произойдёт обрушение пород кровли, что неоднократно

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

подтверждено на практике. Для исключения этого явления рекомендуется установка анкеров первого и второго уровней.

Выше и ниже секций механизированной крепи возникают зоны разрушения пород, что приведёт к их обрушению при демонтаже секций крепи. С целью предотвращения обрушения пород после извлечения секций предлагается возведение решётчатой затяжки.

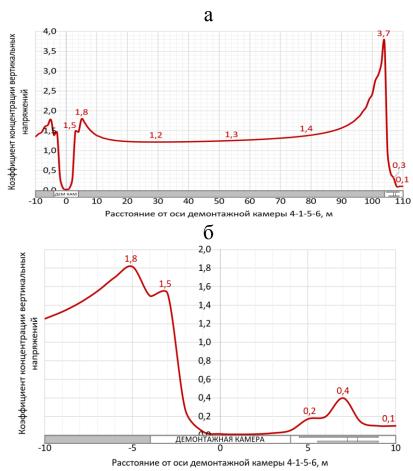


Рисунок 3 - Графики изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений при последовательном приближении очистного забоя к демонтажной камере на расстояние:

а - 100 м; б- 0 м

На рисунке 3 приведены графики изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений. Из анализа графиков следует, что коэффициент концентрации вертикальных напряжений после въезда очистного забоя в демонтажную камеру максимальный в краевой части пласта в боку камеры (рисунок 3а).

Отчётливо выделяется зона предразрушения пласта на этом участке.

В качестве технологических мероприятий для снижения риска возникновения геодинамических явлений предлагается разгрузка краевой части угольного пласта скважинами или принудительное обрушение пород кровли за секциями механизированной крепи.

разработанной Ha Вывод. основе методики геомеханического состояния геомассива в окрестности передовых отрабатываемого длинными очистными забоями обоснованы угольного пласта технологические решения, включающие установку дополнительной крепи, разгрузку краевой пласта, упрочнение горных пород зонах предразрушения. Реализация указанных мероприятий обеспечивает устойчивость передовых выработок эксплуатационную подземной отработке угольных пластов, подтверждено практикой ведения горных работ на шахтах южного Кузбасса.

## Список литературы

- 1. Методы и средства решения задач горной геомеханики / Г.Н. Кузнецов, К.А. Ардашев, Н.А. Филатов и др. М.: Недра, 1987. 248 с.
- 2. Булычёв Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н.С. Булычев. М.: Недра, 1989. -270 с.
- 3. Контроль кровли в пластовых выработках: пер. с нем. / М.Юнкер [и др.]. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2015.-680 с.
- 4. Свидетельство о регистрации электронного ресурса. № 21123. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газоносном геомассиве / В.Н. Фрянов, О.А. Петрова, Т.В. Петрова, ФГБОУ ВПО Сиб. гос. индустр. ун-т. Гос. акад. наук, ИНИПИ РАО, ОФЭРНиО; дата регистрации 03.08.2015.
- 5. Цветков А.Б., Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. Нелинейная математическая модель геомеханического состояния углепородного массива / А.Б. Цветков, Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов

// Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 1. - C.~365–370.

6. Павлова Л.Д. Разработка модели для численного исследования напряженно-деформированного состояния геомассива при движении очистного забоя / Л.Д. Павлова, Е.С Корнев, А.В. Корнева // Инженерный вестник Дона. − 2019. − № 6. − Режим доступа: <a href="http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6073">http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6073</a>

УДК 625.143.48

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ И ЛОКАЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

**Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А. А. Усольцев, А.Р. Михно** Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Рассмотрена проблема образования локальных закаленных участков в металле сварного стыка в процессе сварки рельсов при изготовлении бесстыкового пути. Предложено использование новой технологии сварки с управлением охлаждением металла после сварки путем пропускания переменного электрического тока по заданным режимам.

Ключевые слова: рельсы, контактная сварка, термическая обработка, режим сварки, твердость, зона термического влияния.

Для изготовления бесстыкового железнодорожного пути на сегодняшний день в мире используется электродуговая, термитная, газопрессовая и электроконтактная сварка. Электродуговая сварка рельсов используется В основном на промышленных малоответственных путях, так как она малопроизводительна, качество получаемых соединений не соответствует современным требованиям. Термитная сварка широко распространена границей, имеет относительно малую надежность сварных стыков рельсов соответственно низкие технико-экономические И

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

показатели жизненного цикла, в связи с чем, получила малое распространение в нашей стране. Газопрессовая сварка позволяет получить высокие механические свойства сварного соединения, однако, у нее низкая производительность и высокие экономические затраты. Самое широкое распространение в России получила сварка рельсов, благодаря электроконтактная надежности получаемых соединений, производительности и экономической эффективности. При этом разработанные в настоящее время способы особенно сварки рельсов, эксплуатируемых высокоскоростных магистралях, не в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к качеству сварных соединений.

Переход объемно термоупрочненных OTК дифференцированно термоупрочненным с прокатного нагрева, привел для повышения закаливаемости к увеличению содержания электроконтактной хрома рельсовой стали. При интенсивный нагрев, реализуемый пульсирующим оплавления с последующим быстрым охлаждением, способствует закалочных структур на месте микрообъемов с повышенным содержанием хрома. Участки мартенсита являются концентраторами напряжений и приводят к развитию усталостных трещин и хрупкому излому.

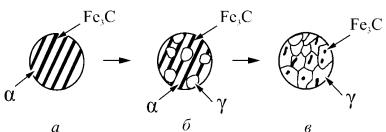
Проблема образования локальных закаленных участков в процессе изготовления бесстыкового пути при сварке рельсов решается использованием обязательной локальной термической обработкой сварного стыка, в результате которой исключается образование закалочных структур. Однако, при этом возможно появление новых 30H термического влияния  $\mathbf{c}$ пониженной твердостью ПО сравнению c зонами при сварке электроконтактным способом без термической обработки. При эксплуатации сваренные таким образом рельсы характеризуются повышенным износом поверхности катания на данных участках и смятием головки на месте сварного стыка, что и является основной причиной изъятия рельсов из пути ранее гарантированного срока.

Известно, что в рельсах из перлитной стали снижение твердости в зоне термического влияния связано с образованием зернистого перлита, но механизм образования этой структуры обычно не обсуждается. Это часто рассматривается как очевидное

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

следствие подводимого тепла при сварке. Поэтому исследование данного процесса позволит дать обоснованные рекомендации по минимизации негативных последствий термического цикла сварки.

Процесс образования участков с пониженной твердостью схож с процессом сфероидизирующего отжига, применяемого на производстве понижения твердости ДЛЯ И улучшения обрабатываемости сталей резанием. Для получения зернистого виде (цементита округлых зерен) В проводят сфероидизирующий отжиг, который состоит из нагрева стали до температуры несколько выше линии PSK (точка Ac1), выдержки и последующего охлаждения. При нагреве стали несколько выше критической точки Ас1 первоначальные зародыши аустенита в ее образуются сдвиговым путем при сохранении когерентных границ. Зародыш аустенита возникает на межфазной границе раздела феррита и цементита (рисунок 1а). В результате образуется низкоуглеродистый ЭТОГО превращения аустенит образовавшемся по сдвиговому механизму 16). В аустените растворяется низкоуглеродистом цементит, содержание углерода в аустените приближается к равновесному. Рост участков аустенита в результате полиморфного превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  протекает быстрее, чем растворение цементита. Избыточные структурные составляющие не переходят полностью в раствор и при последующем охлаждении являются центрами сфероидизации цементита (рисунок 1в).



a  $\delta$   $\epsilon$  a – исходная структура металла рельсов,  $\delta$  – рост участков аустенита,  $\epsilon$  – нерастворенный цементит, в дальнейшем являющийся центром сфероидизации цементита

# Рисунок 1 – Процесс образования центров сфероидизации цементита в 3TB при нагреве от тепла сварки

При последующем охлаждении происходит коагуляция цементита на участках оставшегося нерастворенного карбида и укрупнение зерен цементита — сфероидизация. На рисунке 2

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

схематически показаны два типа эвтектоидных превращений: образование пластинчатого (а) и зернистого перлита (б).

Дисперсность перлита зависит от состава стали и условий охлаждения, а замедленное охлаждение способствует укрупнению карбидов и наоборот. Скорость охлаждения, воздействуя на диффузионные превращения, оказывает значительное влияние на структуру и свойства ферритно-цементитной смеси, которая образуется при распаде аустенита. При сварке рельсов образование зернистого перлита происходит на участках, температура которых достигает значений, входящих в интервале между критическими точками Ac1 и Acm.

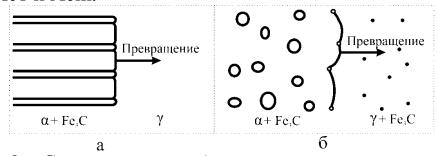


Рисунок 2 — Схематическое образование: а - пластинчатого и б - зернистого перлита (аустенит -  $\gamma$ , образующий феррит -  $\alpha$  и цементит -  $Fe_3C$ )

Для определения критических температур Ac1 и Acm исследуемой рельсовой стали были проведены термодинамические расчеты с использованием программного обеспечения Thermo-Calc® (база данных TCFE) с учетом полученного спектрометрией химического состава образцов

Используя полученные результаты определения химического состава в качестве входных данных для термодинамических расчетов, были смоделированы положения критических точек и области фазового равновесия для рельсовой стали (рисунок 3). Для стали с содержанием углерода 0,77 % расчеты показывают, что полное превращение в феррит и цементит будет происходит при температуре около 720 °C и между температурами 720 и 730 °C будет существовать три фазы. Выше 730 °C – межкритическая область (аустенит и цементит) примерно до 770 °C.

В ходе работы смоделированы изменение положения критических точек и области фазового равновесия для рельсовой

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

стали  $76XC\Phi$  с минимальным (рисунок 4 а) и максимальным (рисунок 4 б) содержанием легирующих элементов по ГОСТ Р 51685-2013.

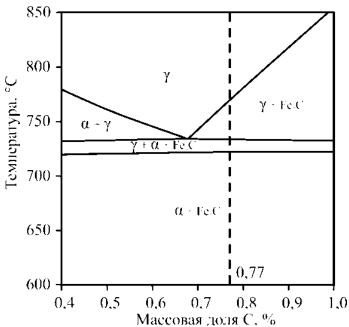


Рисунок 3 — Диаграмма состояния железо-углерод, полученная с помощью термодинамических расчетов, показывающая предсказанное равновесие между фазами феррита (α), аустенита (γ) и цементита (Fe<sub>3</sub>C)

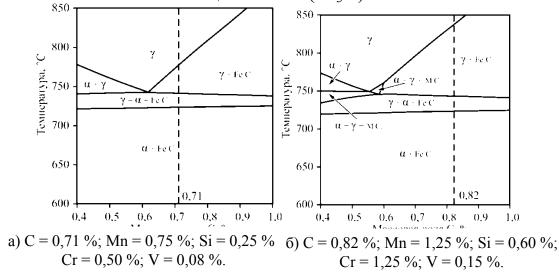


Рисунок 4 — Диаграммы состояния железо-углерод, полученная с помощью термодинамических расчетов, показывающая предсказанное равновесие между фазами феррита (α), аустенита (γ) и цементита (Fe<sub>3</sub>C)

Для сталей с содержанием углерода 0,71 % и 0,82 % расчеты определили, что полное превращение в феррит и цементит будет

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

происходит при температуре около 725 ° С для двух сплавов и до температур 740 и 745 °С будет существовать три фазы. Выше 745 °С сплав имеет межкритическую область (аустенит и цементит) до 775 °С и 840 °С для сплавов с минимальным и максимальным содержанием легирующих элементов для стали 76 ХСФ соответственно (рисунок 4 а, б).

Определено результатами термодинамического анализа (рисунок 3, 4), что сталь 76ХСФ является заэвтектоидной. Образование зон с пониженной твердостью в сварном соединении неизбежно в результате градиента температуры, создаваемого процессом сварки. При увеличении содержания легирующих элементов в стали температурная область между критическими точками Ac1 и Acm увеличивается, что приводит к увеличению протяженности зоны с пониженной твердостью в сварном соединении.

Для получения минимальной протяженности пониженной твердостью возможно проведение сварки рельсов на жестких режимах электроконтактным способом пульсирующим методом оплавления, а для исключения образования дефектов в виде закалочных структур возможно управление охлаждением сварного соединения с помощью контактного нагрева. Источником ДЛЯ контактного нагрева предлагается использовать трансформатор рельсосварочной машины, на которой непосредственно производится сварка.

В процессе охлаждения стали превращение аустенита происходит только после его переохлаждения ниже температуры  $A_{r1}$ , что объясняется изменением свободной энергии фаз и структур сплавов при нагреве и охлаждении. При переохлаждении стали аустенит превращается в пластинчатый перлит. При малой степени переохлаждения аустенита в интервале температур образуется перлит. При большей степени переохлаждения в интервале температур после превращения аустенита образуется сорбит. При еще больших степенях переохлаждения в интервале температур получают троостит [1].

Управление охлаждением металла после сварки предлагается осуществлять путем пропускания переменного электрического тока по заданным режимам [2-3]. Исследуемыми параметрами

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

управляемого охлаждения являются: X1 – время охлаждения после (характеризуется скоростью охлаждения (степень переохлаждения аустенита) и температурой Т1, которой происходит охлаждение); Х2 – время подогрева (характеризуется температурой Т2, до которой происходит нагрев); Х3 – время охлаждения после подогрева (характеризуется температурой Т1, до которой происходит охлаждение); Х4 - количество импульсов (характеризуется инкубационным подогрева превращения аустенита в перлит). На рисунке 5 схематически представлен график управляемого охлаждения.

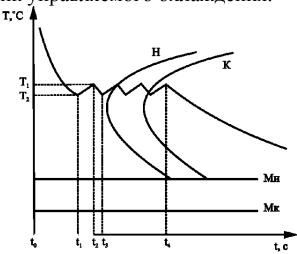


Рисунок 5 – Диаграмма изотермического распада аустенита с режимом управляемого охлаждения заготовки после сварки

#### Выводы:

- 1. Использование локальной термической обработки сварного стыка рельсов, сваренных электроконтактным способом, исключает образование участков, содержащих закалочные структуры. Причем локальная термическая обработка приводит к увеличению ЗТВ.
- Установлено, что при сварке рельсов исследуемого 2. состава образование зернистого перлита происходит в участках, с температурой, соответствующей интервалу между точками Ас<sub>1</sub> и термодинамических помощью расчетов на основе обеспечения Thermo-Calc® программного определены температуры критических точек Ас1 и Аст и области фазового равновесия для различных составов исследуемой рельсовой стали 76ХСФ

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

3. Показано, что минимальной ДЛЯ получения протяженности участка c пониженной твердостью возможно проведение сварки рельсов на жестких режимах электроконтактным способом пульсирующим методом оплавления, а для исключения образования дефектов в виде закалочных структур возможно управление охлаждением сварного соединения с помощью контактного нагрева с использованием трансформатора рельсосварочной машины.

#### Список использованной литературы

- 1. Скугорова Л.П. Материалы для сооружения газонефтепроводов и хранилищ: уч. пособие / Л. П. Скугорова. М.: Недра, 1989. 344 с.
- 2. Шевченко Р.А., Расчет оптимальных режимов электроконтактной сварки железнодорожных рельсов / Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Шишкин П.Е., Крюков Р.Е., Усольцев А.А. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2016. № 37. С. 175 180.
- 3. Шевченко Р.А. Методика исследования влияния режимов изотермического отжига при сварке рельсовой стали / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.И. Куценко, А.А. Усольцев, А.А. Куценко // Вестник СибГИУ. 2018. № 4 (26). С. 8 11.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 р\_а «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов»

УДК 625.143.48

### ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

# **Р.А.** Шевченко, Н.А. Козырев, А. А. Усольцев, А.Р. Михно Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

В лабораторных условиях на образцах из рельсовой стали изучено влияние режимов сварки с последующей изотермической выдержкой, производимой путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки, на качественные показатели сварного стыка.

Ключевые слова: рельсы, контактная сварка, термическая обработка, режим сварки, твердость, зона термического влияния.

В лабораторных условиях проводились работы по изучению влияния режимов сварки с последующей изотермической выдержкой образцов из рельсовой стали, производимой путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки, на качественные показатели сварного стыка.

Сварка образцов производилась на машине для контактной стыковой сварки MC-2008  $\mathbf{c}$ внесением ряда изменений управляющие воздействия (рисунок 1) [1]. Модернизированная машина для контактной стыковой сварки оплавлением содержит корпус 1, установленные на нем подвижный 2 и неподвижный 3 зажимы, соединенные с устройствами зажатия свариваемых деталей 4, закрепленными на основаниях зажимов 1 и 2, механический привод оплавления и осадки 5, соединенный с 2, систему охлаждения 6, подвижным зажимом сварочный переключатель 8 ступеней напряжения трансформатор трансформатора сварочного релейную 7, панель управления (на схеме не показан), блок концевых выключателей 10, контактор включения сварочного тока 11, электродвигатель 12 осадки, который через привода оплавления И концевой

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

выключатель, предназначенный для подачи сигнала на контроллер этапа термообработки, и расположенный в блоке 13 о начале концевых выключателей 10 соединен c контроллером Контроллер 13 соединен со сварочным трансформатором 7 c 14, который соединен с контактором симистора помощью включения сварочного тока 11 при помощи контактного реле (на схеме не показано), установленного на релейной панели 9.

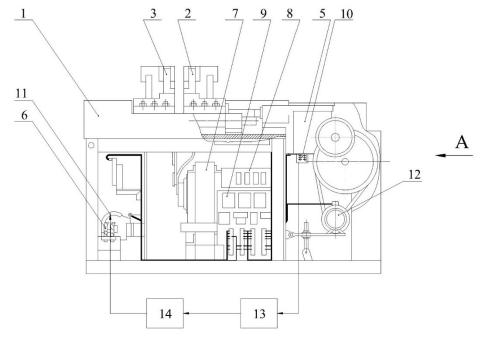


Рисунок 1 — Схема модернизированной машины MC–2008 для контактной стыковой сварки

Для получения информации о термическом влиянии на структуру металла разработана методика измерения температур в ЗТВ во время сварки. При этом производилось измерение силы сварочного тока и температуры образцов с целью дальнейшей корректировки режимов. Схема взаимодействия используемого оборудования приведена на рисунке 2. Для измерения температуры металла в ЗТВ использовались хромель-алюмелевые термопары. Сбор и обработку данных, полученных от термопар, производили с помощью измерительного комплекса «Тетров». Температура металла сварного шва, где нет возможности установить термопару, измеряется с помощью тепловизора HotFind-D.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов



Рисунок 2 – Блок - схема оборудования

Для построения математических моделей влияния параметров импульсного послесварочного контактного подогрева на понижение твердости металла сварного соединения относительно основного металла и модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность зоны термического влияния использовали планируемый эксперимент, позволяющий построить качественные математические модели и сократить количество экспериментов. Исследование проведено с использованием полного факторного эксперимента  $N=2\cdot 3^k$  [2-7]. Исследуемыми параметрами управляемого охлаждения являются: Х<sub>1</sub> – время охлаждения после осадки (характеризуется скоростью охлаждения (степень переохлаждения аустенита) и температурой  $T_1$ , до которой происходит охлаждение);  $X_2$  – время подогрева (характеризуется температурой  $T_2$ , до которой происходит нагрев); время охлаждения после подогрева (характеризуется температурой  $T_1$ , до которой происходит охлаждение);  $X_4$  – количество импульсов подогрева (характеризуется инкубационным периодом превращения аустенита в перлит). Математическая обработка экспериментальных данных проводилась по известным методикам, изложенных в работах.

Вырезка образцов размером 90 мм ×30 мм ×10 мм с известным химическим составом, осуществлялась из головки рельсового профиля. После сварки на модернизированной машине МС-2008 при различных режимах согласно исследуемой матрицы проводили снятие грата и измерение твердости с помощью твердомера УЗИТ-3. Далее образцы разрезались перпендикулярно сварному шву на два образца электроэрозионным способом на

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ струйного типа ДК7732 М11. Из одного образца вытачивали по ГОСТ 1497-84 цилиндрические образцы типа III № 6 с расчетной длинной Второй рабочей 30 образец части MM. металлографического анализа на неметаллические включения и микроструктуру сварного соединения. Исследования проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле при диапазоне увеличений в 100 – 1000 крат после травления азотной кислоты. спиртовом растворе Микротвердость измерялась с помощью микротвердомера HVS-1000.

Таблица 1 – Результаты эксперимента

<b>№</b> образцов	$\mathrm{HB}_{\mathrm{min}}$	$\mathrm{HB}_{\mathrm{max}}$	Δ <sub>min</sub> , %	$\Delta_{\max}$	Δ, %	Протяженность ЗТВ, мм	σ <sub>т</sub> , Η/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\rm B}$ , $H/{\rm MM}^2$	δ <sub>5</sub> ,	ψ,	Наличие неметаллических включений
1	290	414	17,40	18,29	35,69	10,0	660	990	3,2	4,4	+
2	297	364	15,20	3,90	19,1	6,5	650	750	1,7	4,7	+
3	322	370	8,00	5,81	13,81	6,0	530	570	1,2	3,6	+
4	326	385	6,85	10,00	17,43	5,0	720	870	0,4	4,3	+
5	279	364	20,23	4,00	24,23	16,0	800	810	1,2	4,3	+
6	280	391	20,00	11,71	31,71	16,0	770	980	1,5	4,9	+
7	264	404	24,48	15,33	39,81	20,0	880	1080	2,8	5,7	_
8	319	601	8,76	71,83	80,59	26,0	970	1010	1,2	5,0	_
9	281	378	19,71	8,00	27,71	17,0	-	465	0,8	3,8	+

В таблице 1 представлены результаты эксперимента и полученные физико-механические свойства образцов: твердость HB, протяженность 3ТВ (мм); предел текучести  $\sigma_{\rm T}$  (H/мм<sup>2</sup>); временное сопротивление  $\sigma_{\rm B}$  (H/мм<sup>2</sup>); относительное удлинение  $\delta_{\rm 5}$ (%); относительное сужение  $\psi$  (%); наличие неметаллических Кроме того, проведен расчет включений в металле шва. отклонений твердости относительно требований, установленных ΓOCT P сварного 51685-2013 поверхности на соединения образцов: понижение  $\Delta_{\min} = ((350 \text{HB} - \text{HB}_{\min}) / 350 \text{HB}) \cdot 100 \%$  и повышение твердости  $\Delta_{\text{max}} = ((HB_{\text{max}} - 350HB) / 350HB) \cdot 100 \%$ , суммарное отклонение твердости

 $\Delta = \Delta_{\min} + \Delta_{\max}$  (%).

Изучение макроструктуры сварных соединений лабораторных образцов выявило наличие нескольких зон, образованных в

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

результате действия тепла сварки и кратковременного подогрева, используемого для управляемого охлаждения. Выделяются 4 участка с различными структурами металла:

- 1. Шов микроструктура представляет крупнозернистый сорбитообразный перлит. Образование закалочных структур практически на всех образцах отсутствует, даже при скорости охлаждения при которой характерно образование мартенсита для данных сталей. Это обусловлено снижением содержания углерода в сварном шве, в момент оплавления при взаимодействии жидкого металла с атмосферой происходит его окисление.
- 2. Участок неполного расплавления. Структура образцов № 2, 3, 4, 9 состоит из крупнозернистого сорбитообразного перлита. При исследовании образцов № 1, 6, 8 отмечено наличие крупнозернистой структуры (2-3 номер шкалы ГОСТ 5639-82) с преобладанием мартенситной составляющей, характерной для перегретого металла. Образцы № 5,7 имеют преобладающую структуру крупнозернистого сорбитообразного перлита и небольшие участки мартенсита размером от 20 до 80 мкм.
- 3. Участок нормализации в процессе нагрева протекает фазовое превращение перлита в аустенит и его гомогенизация. Структура образцов № 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 представляет собой мелкодисперсный перлит. У образца № 8 практически отсутствует данный участок вследствие высокой скорости охлаждения, не соответствующий скоростям охлаждения при нормализации.
- 4. Участок сфероидизации перлита в процессе нагрева протекает фазовое превращение перлита в аустенит, но вследствие недостаточной температуры и малого времени гомогенизация При аустенита происходит. последующем не охлаждении происходит коагуляция цементита на участках оставшегося нерастворенного карбида и укрупнение зерен цементита сфероидизация.

На всех образцах присутствует данный участок, имеющий различные размеры в зависимости от режима управляемого охлаждения.

На рисунках 3 и 4 для образца 1 приведено влияние микротвердости от объемной доли структурных составляющих.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

При увеличении объемной доли зернистого перлита происходит снижение микротвердости.

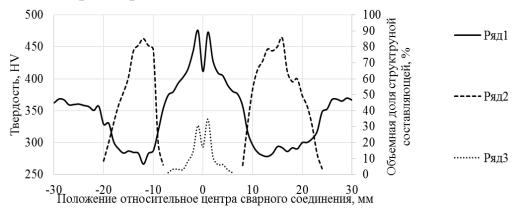


Рисунок 3 – Распределение микротвердости, объемной доли структурных составляющих в сварном соединении образца № 1

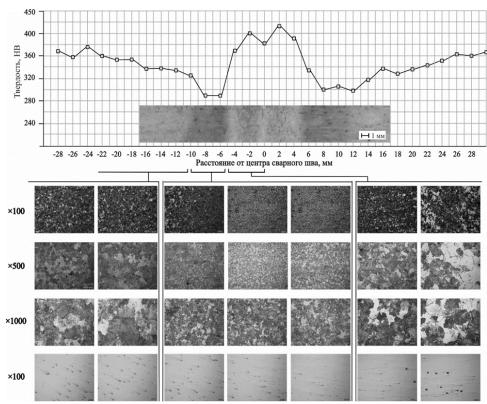


Рисунок 4 — Распределение твердости, неметаллических включений и структуры в сварном соединении образца № 1

При увеличении количества закалочных структур происходит увеличение твердости. На рисунке 4 приведено сравнение значений размеров участка сфероидизации (зернистого) перлита полученных

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

значений мгновенного распределения помощью известных температурных полей в зоне термического влияния и критических точек Аст и Ас1 и фактической объемной доли зернистого перлита. Характер изменения размера данных участков, полученных разными способами имеет корреляцию R = 0,98. При этом значения полученные расчетным путем отличаются от фактических, это связано с тем, что критические точки Аст и Ас1 полученные с помощью термодинамического моделирования определяются для отожжённого сплава, что отличается от условий процесса сварки. Тем не менее, критические точки достаточно хорошо прогнозируются расчетами.

#### Выводы

- 1. В лабораторных условиях опробован способ контактной стыковой сварки, позволяющий получать сварное соединение изделий из рельсовой стали с равномерным распределением твердости и малой зоной термического влияния.
- 2. Определено влияние микротвердости от объемной доли структурных составляющих. При увеличении объемной доли зернистого перлита происходит снижение микротвердости. При увеличении количества закалочных структур происходит увеличение твердости.
- 3. Построены модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости металла сварного соединения относительно основного металла и модель влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность зоны термического влияния.
- 4. Предлагаемый способ позволяет производить регулирование структуры сварного соединения рельсов, не прибегая к дополнительной локальной термической обработке.

#### Список использованной литературы

1. Пат. 2683668 РФ, МПК В23 11/04. Машина для контактной стыковой сварки / Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Кратько С.Н., Хомичева В.Е. // Заявл. 25.12.2017; опубл. 01.04.2019.

- СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов
- 2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1976. 279 с.
- 3. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика / В.Е. Гмурман. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
- 4. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистики / В.Е. Гмурман. М.: Высш. школа, 1979, 400 стр.
- 5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.
- 6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 464 с.
- 7. Костин В.Н. Статистические методы и модели: учеб. пособие / В.Н. Костин, Н.А. Тишина. Оренбург: Изд-во ОГУ, 2004.-138 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 р\_а «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов»

УДК 625.143.48

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ НА МАШИНЕ МСР-63.01

# Р.А. Шевченко<sup>1</sup>, Н.А. Козырев<sup>1</sup>, А. А. Усольцев<sup>1</sup>, А.Р. Михно<sup>1</sup>, С.Н. Кратько<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42) <sup>2</sup>ООО «РСП-М» структурное подразделение рельсосварочное предприятие № 29 (РСП-29)

(652380, Кемеровская область, рп Промышленная, ул Зеленая, д 1)

Изучено влияние режимов сварки с последующим управляемым охлаждением полнопрофильных рельсовых стыков, производимого путем

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки на качественные показатели сварного стыка проводили на машине для контактной стыковой сварки МСР-6301 в условиях рельсосварочного предприятия ООО «РСП - М» (РСП-29).

Ключевые слова: рельсы, контактная сварка, термическая обработка, режим сварки, твердость, зона термического влияния.

Изучение влияния режимов сварки cпоследующим управляемым охлаждением полнопрофильных рельсовых стыков, пропускания производимого путем импульсов переменного электрического тока после сварки на качественные показатели сварного стыка проводили на машине для контактной стыковой сварки МСР-6301 в условиях рельсосварочного предприятия ООО «РСП - М» (РСП-29). Для исследования вырезались образцы полнопрофильных рельсов типа Р65 категории ДТ350 длинной 600 MM.

Управление режимами изотермической выдержки сварки осуществлялось с помощью персонального компьютера с изменением программы промышленного контроллера SIMATIC S7–300. С помощью программного обеспечения Simatic Step 7 написана программа, позволяющая задавать режимы управляемого охлаждения. Управляющая программа написана на графическом языке LAD. Для задания необходимых временных параметров 1). использованы таймеры (рисунок Для сварочного трансформатора использовался триггер M50.0, которому на входы S и R подключены последовательно и параллельно контакты, включающиеся по таймерам (рисунок 16). Нормально разомкнутый контакт М21.6 включает таймер Т13 в момент окончания осадки. Таймер Т13 задает суммарное время цикла управляемого охлаждения, при включенном таймере Т13 реле М55.0 замыкает контакты М55.0. Таймер Т14 задает время осадки размыкает контакты выдержки после И замкнутого контакта М55.1 посредством включения реле М55.1. После отключения таймера Т14 сигнал проходит на триггер М50.0 до момента окончания работы таймера Т22, который включением реле М55.3 размыкает контакт М55.3. М55.3 запускает таймер Т23, который задает время паузы между включениями сварочного

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

трансформатора и т.д. Таким образом, добавляется нужное количество таймеров в соответствии с количеством импульсов пропускаемого электрического тока через сварной стык. Для включения и отключения режима управляемого охлаждения используется нормально разомкнутый контакт DB22.DBX160.0.

Этапы технологического процесса построены из участков оплавления, в которых устанавливаются основные режимы регулирования. Каждый участок определяет величину оплавления S, в котором устанавливается напряжение U, скорости Vв, Vн (вперед, назад) и границы токов управления Ікор, Іост, Ірев [1].

Для поиска оптимальных режимов управляемого охлаждения в первой серии экспериментов проведен полный факторный эксперимент  $N=2^k$ 

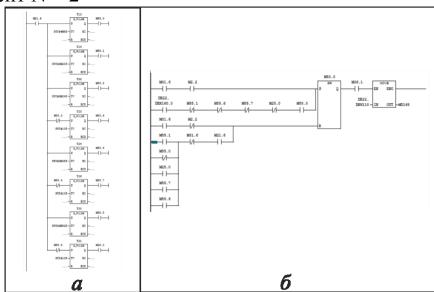


Рисунок 1 — Программа, отвечающая за управляемое охлаждение На рисунке 2 представлена осциллограммы процесса сварки для образца 1.

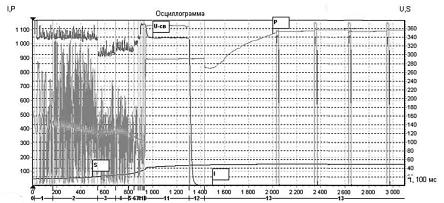


Рисунок 2 – Осциллограмма сварки образца 1

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

В дальнейшем проводили испытание нетермообработанных стыков на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД «Рельсы 1.08.002-2009 железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на статический изгиб проводили на прессе типа ПМС-320. Контрольные образцы испытывались после сварки и удаления грата без дополнительной обработки стыков. При испытаниях на статический поперечный изгиб контрольный образец имел длину не менее 1200 мм со сварным стыком по середине. Нагрузку прикладывали в середине контрольного образца месте сварного пролета В расстоянием между опорами 1 м. Испытание контрольного образца производили, с приложением нагрузки на головку. Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе  $P_{\text{изг}}$ , кH и значения стрелы прогиба  $f_{\text{пр}}$ , мм при которых происходит разрушение контрольного образца, либо максимальные значения данных показателей, если образец не разрушился во испытаний. На рисунке 3 сравнение образца №3 с образцом без импульсной обработки.

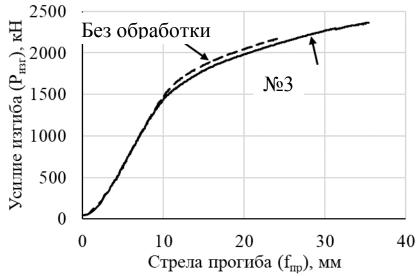


Рисунок 3 — Результаты испытаний на статический трехточечный изгиб

В результате эксперимента образцы № 3 ( $P_{изг} = 2364$  кH,  $f_{пр} = 35,4$  мм) и № 8 ( $P_{изг} = 2244$  кH,  $f_{пр} = 31,2$  мм) имеют значения показателей испытаний выше ( $P_{изг} = 2000$  кH,  $f_{пр} = 27$  мм) требований СТО РЖД 1.08.002-2009. В ходе экспериментов были

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

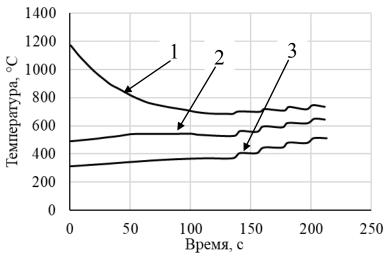
получены регрессионные модели для выходных параметров усилия при изгибе и стрелы прогиба.

$$P_{\text{M3}\Gamma} = 1926,5 - 2,05 \text{ X}_1 + 64,38 \text{ X}_2 + 3,2 \text{ X}_3; \text{ R}^2 = 0,61,$$
  
 $f_{\text{np}} = 15,72 - 0,04 \text{ X}_1 + 2,37 \text{ X}_2 + 0,07 \text{ X}_3; \text{ R}^2 = 0,51.$ 

Формирование благоприятных механических свойств сварного соединения произошло в некоторой степени из-за замедления скорости охлаждения в связи с реализацией режимов изотермической выдержки (рисунок 4 и 5).

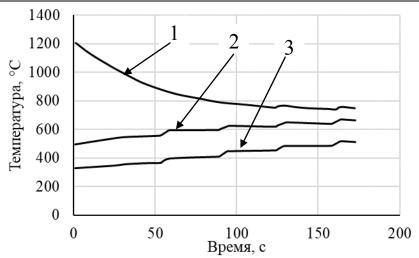
Для подтверждения результатов проведена вторая серия экспериментов где повторно проведена сварка на режиме с наилучшим результатом испытаний, а также выбран режим управляемого охлаждения с более низкой температурой начала подогрева.

Результаты второй серии экспериментов подтвердили воспроизводимость параллельных опытов. При снижении температуры начала подогрева, т. е. увеличение параметра X1 привело к повышению механических свойств сварного стыка рельсов.



1 – центр шва, 2 – 20 мм от центра шва, 3 – 28 мм от центра шва Рисунок 4 – График охлаждения после сварки образца № 3

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов



1 – центр шва, 2 – 20 мм от центра шва, 3 – 28 мм от центра шва Рисунок 5 – График охлаждения после сварки образца № 8

Изучение макроструктуры производилось на двух продольных макротемплетах сварных стыков, один из которых получен по базовой технологии, используемой в настоящее время на рельсосварочных предприятиях РФ (образец А), а второй ¬- по предлагаемому способу (образец Б). Термообработка сварного Α производилась стационарным стыка индукционным нагревательным термообработки комплексом ДЛЯ рельсовых стыков УИН 001-100/РТ-С по режимам используемым в настоящее время на предприятиях ООО «РСП-М». Режим индукционной термообработки с подстуживанием головки рельса приведен на рисунке 6. В качестве образца Б использовался образец с наилучшими показателями испытания на статический изгиб (образец № 11).

При изучении макроструктуры металла сварного соединения, полученного по базовой технологии, по обе стороны от шва наблюдается темнотравящаяся неравномерная зона термического влияния, полученная после термической обработки. Указанная зона имеет линейные размеры (в одну сторону от шва): в головке – 51 мм, в шейке – от 45 до 62 мм, в подошве – 64 мм. Флокены в металле не выявлены.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов

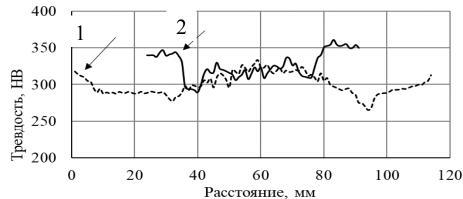
производственных комплексов T, °C б a1000 1,00 800 0,80 600 0,60 400 0,40 200 0,20 0 68 136 272 150 Время, с Время, с

a — режим нагрева, o — режим закалки (охлаждение сжатым воздухом)

Рисунок 6 – Режимы термической обработки сварного стыка А

На продольном макротемплете образца Б наблюдается равномерная зона термического влияния, полученная после сварки. На всем протяжении стыка зона термического влияния имеет ширину равную (в одну сторону от шва) 22 мм. Флокены в металле не выявлены.

Твердость металла сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки сварного стыка А колеблется от 265 НВ до 318 НВ. Твердость металла сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки стыка Б колеблется от 292 НВ до 355 НВ. Распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов показано на рисунке 7. Твердость основного металла на поверхности катания головки составляет 348-354 НВ.



 1 – распределение твердости в поперечном направлении сварному соединении, изготовленным по стандартной технологии, 2– распределение твердости, полученное по предлагаемому способу

Рисунок 7 — Распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Снижение твердости металла головки в зоне термической обработки сварного стыка А относительно нижней границы твердости основного металла рельса достигает 24,5 %, а протяженность зоны с пониженной твердостью составляет 42 мм. Снижение твердости в зоне термического влияния сварного стыка Б достигает 14,8 %, при этом протяженность зон с пониженной твердостью составляет 14 мм.

Проведенные эксперименты позволили разработать новый способ контактной стыковой сварки [2], позволяющий получать сварное соединение рельсов типа P65 категории ДТ350 со свойствами превосходящими технические требования СТО РЖД 1.08.002-2009.

#### Выводы

- 1. Экспериментально подтверждено положительное влияние кратковременного воздействия электрического тока во охлаждения рельсового стыка после сварки на результаты испытаний статического трехточечного изгиба без термической обработки по СТО РЖД 1.08.002-2009 рельсов типа Р65 категории ДТ350. Проведение изотермической выдержки путем пропускания четырех кратковременных импульсов длительностью 10 секунд переменного электрического тока через сварное соединение в момент охлаждения после сварки (через 200 секунд после осадки) увеличить показатели статического трехточечного позволяет изгиба: усилие изгиба  $P_{\text{изг}}$  на 25 %, стрелу прогиба  $f_{\text{пр}}$  на 49 %.
- 2. Разработан новый способ контактной стыковой сварки рельсов и проведено его промышленное опробование на предприятии структурном подразделении (СТП) ООО "РСП-М" (РСП-29).

#### Список использованной литературы

1. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine/ R A Shevchenko, N A Kozyrev, R E Kryukov, A O Patrushev, A A Usoltsev// Metallurgy2017. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 411 (2018) 012088 doi:10.1088/1757-899X/411/1/012088

2. Пат. 2641586 РФ, МПК В 23 К 11/04. Способ контактной стыковой сварки рельсов / Е.В. Протопопов, Н.А. Козырев, Р.А. Шевченко, Р.Е. Крюков, С.В. Фейлер, А.А. Усольцев // Заявл. 07.12.2016; опубл. 18.01.18. Бюл. № 2.

Исследование выполнено при финансовой поддержке  $P\Phi\Phi U$  и Кемеровской области в рамках научного проекта  $\mathcal{N}_{2}$  20-48-420003  $p_{a}$  «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов»

УДК 004.896:517.27:519.85

#### МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОТЛОВЫМ АГРЕГАТОМ

## А.А. Филипас, М.А. Шенделёв, И.М. Тарабукин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Научный доклад содержит 9 с., 3 рисунка, список используемых источников содержит 8 источников.

Ключевые слова: состав дымовых газов, соотношение «топливо-воздух», датчик спектра пламени, котловой агрегат.

Кроме оксида углерода (II) — CO, известного также как угарный газ, оксида углерода (IV) — CO<sub>2</sub>, углекислый газ, и оксидов азота  $NO_x$  (NO и  $NO_2$ ), токсичность которых наиболее на слуху, в дымовые газы, в разных пропорциях в зависимости от типа топлива и режима его сгорания, входят такие соединения как  $SO_2$  — диоксид серы и  $C_xH_y$  — остаточные несгораемые углеводороды, а также сажа — практически чистый углерод (C) и другие мельчайшие твердые частицы.

Все эти соединения можно отнести к вредным выбросам, они либо вредны здоровью человека, либо неблагоприятно влияют на развитие парникового эффекта в атмосфере.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Оксид углерода (II) — ядовитый газ без цвета и запаха, являющийся продуктом неполного сгорания. Угарный газ имеет ту же плотность, что и воздух, в отличие от CO<sub>2</sub>, который тяжелее и поэтому накапливается у поверхности земли. При высоких концентрациях в воздухе, поступая с ним в легкие, CO образует связь с гемоглобином крови, тем самым блокируя возможность связывания с гемоглобином кислорода. Таким образом элементы крови утрачивают возможность доставки кислорода от легких к тканям организма, что приводит к их кислородному голоданию и в итоге к летальному исходу.

Углекислый газ — продукт более полного окисления углерода кислородом, чем угарный газ — также не имеет цвета и запаха, но имеет кисловатый привкус. При его больших концентрациях в атмосфере усиливается парниковый эффект.

При высоких значениях температуры в процессе сгорания присутствующий в топливе азот N (в воздухе он существует в виде молекул  $N_2$ ) реагирует с кислородом воздуха  $(O_2)$ , в результате чего формируется оксид азота (II) – NO. Спустя некоторое время данный бесцветный газ окисляется под воздействием кислорода и образуется оксид азота (IV)  $- NO_2$ .  $NO_2 -$  это водорастворимый дыхательный яд, вызывающий тяжелое поражение легких при вдыхании и способствующий образованию озона под воздействием ультрафиолетового компонента спектра солнечного излучения. Образование оксидов азота зависит от содержания азота в топливе, времени пребывания азота в зоне горения (длины факела пламени) и температуры пламени. При температуре пламени свыше 1300 °C, образование NO<sub>x</sub> резко возрастает. Образование NO<sub>x</sub> можно снизить с помощью современных технологий горения, таких как «холодное пламя», рециркуляция дымовых газов и низкого уровня избыточного воздуха.

Диоксид серы (оксид серы (IV)) — бесцветный и токсичный газ с резким запахом.  $SO_2$  образуется при наличии в топливе серы (S) и вызывает раздражение дыхательных путей и глаз. При взаимодействии с водой  $SO_2$  образует сернистую кислоту  $H_2SO_3$ . Кроме того, в процессе сгорания часть  $SO_2$  (около 3-7 %) окисляется с образованием  $SO_3$  (оксид серы (VI)). Это твердое белое вещество поглощает большое количество воды с

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

образованием серной кислоты ( $SO_3 + H_2O = H_2SO_4$ ), компонента кислотных дождей [1].

Анализ дымовых газов и настройка котельного оборудования производится с помощью газоанализаторов.

Целью для экологически безопасной и максимально эффективной работы топливосжигающей системы является полное сгорание всех компонентов, входящих в состав топлива. Ключом к оптимальной работе является установление объема воздуха, идущего на горение. На практике доказано, что небольшое количество избыточного воздуха является оптимальным для работы системы. На горение подается немного больше воздуха, чем это теоретически необходимо.

невыработанного Потери тепла cдымовыми газами увеличиваются при недостатке воздуха, а также при наличии определенного количества избыточного воздуха. Относительное увеличение объяснить потерь c дымовыми газами ОНЖОМ следующим:

- При недостатке воздуха используемое топливо сгорает не полностью и увеличивается расход топлива;
- При наличии избыточного воздуха большее количество кислорода нагревается и непосредственно через дымоход выводится наружу, при этом, не используясь для вырабатывания тепла.

Максимальная эффективность сгорания достигается только, если потери тепла с дымовыми газами минимальны за счет незначительного количества избыточного воздуха.

#### 1.1. Контроль процесса горения

Контролировать процесс горения топлива можно следующими способами:

- визуально по таким характеристикам факела, как его длина, цвет, светимость.
- по составу продуктов горения, отбор проб которых осуществляется посредством газоанализаторов.

При анализе состава продуктов горения следует прежде всего обратить внимание на содержание оксида углерода СО. Отсутствие СО в данных анализа свидетельствует о полном сгорании топлива

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

и отсутствии потерь теплоты от химической неполноты сгорания. При наличии СО в продуктах сгорания необходимо увеличить подачу воздуха с тем, чтобы в соответствии с производственной инструкцией или режимной картой минимизировать или исключить его содержание в продуктах горения.

Отсутствие СО из числа горючих газов в продуктах сгорания вовсе не свидетельствует о качественном сжигании топлива. Помимо СО необходимо контролировать содержание кислорода и трехатомных газов  $R0_2$  в сухих продуктах горения. С помощью данных о содержании этих компонентов можно установить важнейшую величину, характеризующую качество сжигания топлива — коэффициент избытка воздуха [1].

Применение различных газоанализаторов, как готовых комплексов измерения различных выбросов в атмосферу, так и переносных, служащих для настройки режимов котла на таком топливе, как газ, дизельное топливо, осуществляется 1 раз в 3 года для расчета режима работы котла, так и имеет периодический характер - 1 раз в 3 месяца, безусловно, играет важную роль в продолжительности срока службы котлового агрегата и в правильности его работы в соответствии с рассчитанной режимной картой.

Но возможны различные ситуации, пагубно влияющие на нарушение режимов котла: горения из-за износа оборудования, некачественная поставка комплектующих, перебои автоматики, неправильная работе системы эксплуатация, несоблюдение графиков технического ремонта осмотра И котельного оборудования.

Для того, чтобы отслеживать «он-лайн» различные продукты горения, как их количественный, так и качественный состав, внедряют дополнительно стационарные газоанализаторы, в виде лямбда-зонд, монтируемые в дымоход. Безусловно, это позволяет предотвратить различные аварии и инциденты, путем своевременного обнаружения и устранения проблемы.

Важно отметить, что газоанализатор (датчик угарного газа) не может выдержать высоких температур, создаваемых пламенем горелки. В связи с этим монтаж данного датчика непосредственно внутрь горелки, где осуществляется сам процесс горения

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

невозможен. Также, при использовании газоанализатора вдали от горелки, имеется погрешность, так сказать, «транспортная задержка» передачи и реагирования на сигнал, которая не позволяет своевременно и качественно транспортировать сигнал на контроллер, который регулирует работу горелки и, в свою очередь, соотношение «топливо-воздух». [6]

На горелку подается природный газ и воздух. Воздух подается с помощью дутьевого вентилятора (ДВ). Таким образом, получаемая газовоздушная смесь начинает гореть и отдавать тепло в топочную камеру.

Продукты сгорания, выделяемые при горении природного газа, удаляются в атмосферу через дымовую трубу с помощью дымососа (ДС).

При сжигании природного газа требуется:

- обеспечивать хорошую степень смешения природного газа и воздуха;
  - поддержание горения без переизбытка воздуха;
  - поток газовоздушной смеси разделять на отдельные струи.

Длительность горения природного газа напрямую зависит от времени, которое тратится на смешивание природного газа с воздухом в горелке. Быстрота и качество смешивания природного газа с требуемым количеством воздуха, является основным фактором, от которого зависит скорость и полнота сгорания топлива, температура и длина пламени.

Чтобы поддерживать процесс горения природного газа, продукты сгорания топлива необходимо удалять. Данную задачу выполняет дымосос, который поддерживает необходимое разряжение в дымоходе. [5]

Если поддерживать необходимое соотношение воздуха с природным газом при изменении расхода топлива, можно достигнуть максимума коэффициента полезного действия расхода топлива и уменьшить время реагирования системы на изменения пламени (транспортную задержку).

Для того, чтобы исключать «транспортную задержку», а также время реагирования системы управления котловым агрегатом на такие важные показатели как количество топливо и объем воздуха, необходимый для правильной работоспособности

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

котлового агрегата, и, как следствие, уменьшение выбросов в атмосферу соединений  $NO_x$ ,  $CO_x$ , предлагаем применение датчика спектра пламени (рисунок 1), устанавливаемого непосредственно в горелке. Датчик способен к переносу высоких температур и добавление его в контур управления, в обратную связь, способствует более быстрому реагированию на возмущения и приводит к увеличению быстродействия системы и более точному соблюдению режима работы котельной установки.

Датчик хемилюминесценции собран на основе оптической «Cassegrain». Использование системы зеркал вместо лин3 позволяет избежать генерации хроматических аберраций разных длин волн. Собранный свет от горелки фокусируется на точечном отверстии, расположенном перед оптическим датчиком, которое подключается К специализированному фотодетектора. Свет разделятся на три части с помощью двух Каждая дихроичных зеркал. часть направляется на соответствующие интерференционные фильтры, специфичные для рассматриваемого радикала, при 310,4 нм для ОН\*, 430,5 нм для СН \* и 516 нм для СО\*. Интенсивности света для каждого радикала преобразуются в электрические сигналы с помощью трех фотоумножителей [3].

Датчик хемилюминесценции и блок фотодетектора представлен на рисунке 1.

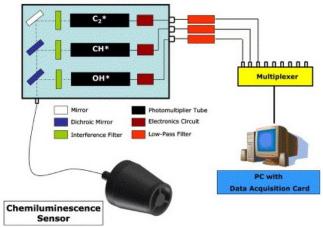


Рисунок 1 – Датчик хемилюминесценции и блок фотодетектора

Тем не менее, интенсивность хемилюминесценции напрямую зависит от тепловой мощности пламени при этом зависимость нелинейная. Данные исследования представлены на рисунке 2. [4]

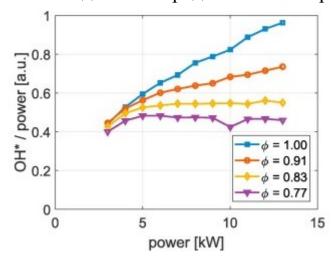


Рисунок 2 – График зависимости интенсивности от мощности горілки

В качестве исполнительного устройства, изменяющего расход воздуха на котел, является центробежный дутьевой вентилятор ВД–2,5 с асинхронным приводным электродвигателем AИР100S2. Данный двигатель можно описать с помощью следующей передаточной функции:

$$W_{AJI}(p) = \frac{K_{AJI}}{T_{\mathcal{P}M} T_{M} p^{2} + T_{M} p + K_{AJI}} = \frac{0.25}{1.2 p^{2} + 2.3 p + 0.25}$$
,(1)

где  $T_{\scriptscriptstyle M}$  — механическая постоянная времени электродвигателя;  $T_{\scriptscriptstyle 9M}$  — электромагнитная постоянная времени электродвигателя.

Динамические свойства центробежного дутьевого вентилятора ВД-2,5 с необходимой точностью можно описать апериодическим звеном первого порядка:

$$W_{AB}(p) = \frac{K_{AB}}{T\partial\partial p + 1} = \frac{1.255}{2.5 + 1}$$
, (2)

 $T_{\partial e}$  — постоянная времени центробежного дутьевого вентилятора;

 $K_{DB}$  — коэффициент передачи равный отношению номинальной производительности к номинальным оборотам рабочего колеса.

Собранная из данных звеньев модель CAP в среде SIMULINK представлена на рисунке 3.

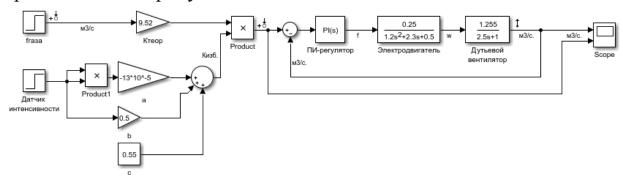


Рисунок 3 — Модель САР температуры теплоносителя в SIMULINK

Для формирования управляющего воздействия воспользуемся ПИ-регулятором. Выбор ПИ-регулятора обусловлен физическими характеристиками объекта управления.

Замкнутый контур регулирования функционирует следующим образом. Так как расход воздуха напрямую зависит от частоты оборота рабочего колеса дутьевого вентилятора, будем считать, что объектом управления является сам дутьевой вентилятор. Необходимый расход воздуха вычисляется следующим образом: текущий расход газа, помноженный на коэффициент теоретически необходимого воздуха помноженный на коэффициент избытка воздуха, вычисляемый по датчику интенсивности. [7]

Разность текущего и необходимого воздуха или же ошибка поступает на ПИ-регулятор. Данный сигнал (ошибка) поступает на ПИ-регулятор. ошибки зависимости  $\mathbf{OT}$ значения c ПИ-В управляющее регулятора воздействие поступает на устройство. Исполнительное устройство, исполнительное воздуха, подачу асинхронного отвечающее состоит ИЗ 3a электродвигателя и дутьевого вентилятор который управляется частотным преобразователем.

Управляющее воздействие воздействует на исполнительные устройства, тем самым, регулируя показатели расхода воздуха.

Для настройки коэффициентов ПИ-регулятора воспользуемся методом Шеделя. Данный метод основан на принципе каскадного коэффициента демпфирования, где производится обобщение понятия коэффициента демпфирования для системы 3-го порядка. [8]

В нашем случае передаточная функция системы будет выглядеть следующим образом:

$$W_{oy}(s) = \frac{0.31375}{3 s^3 + 6.95s^2 + 3.55s + 0.5} = \frac{0.6275}{6s^3 + 13.9s^2 + 7.1s + 1}.$$
 (3)

Коэффициенты ПИ регулятора вычисляются по следующей формуле:

$$T_d = \frac{T_2^2}{T_1} - \frac{T_3^3}{T_2^2}, \ T_i = \frac{T_1^2 - T_2^2}{T_1 - T_d}, \ K_p = \frac{0.37T_i}{K(T_1 - T_i)}. \tag{4}$$

В результате настройки коэффициентов ПИ-регулятора с помощью метода Шеделя, коэффициент для П вышел равным 6,886, а для И коэффициента 6,54.

Динамические характеристики при уставке в 16 м<sup>3</sup> представлены на рисунке 3.

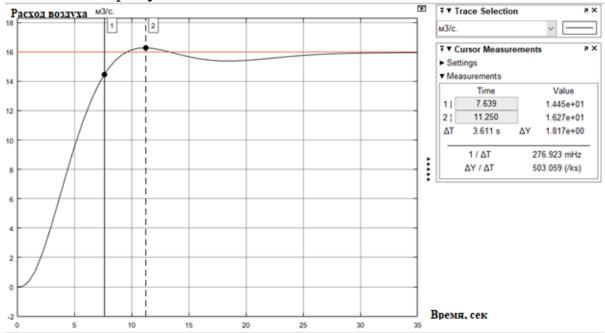


Рисунок 3 – Динамические характеристики системы

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов производственных комплексов

Таким образом мы достигли высокое быстродействия системы при небольшом перерегулировании в 1,67 %. Время переходного процесса составило 11,25 секунд [2].

Применение датчика спектра пламени горелки увеличивает быстродействие системы и исключает «транспортную задержку», которая присутствует при использовании газоанализаторов, ведь выход дымохода, где осуществляется замер выходных газов, находится на значительных расстояниях от горелки.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
Секция 1 Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода, подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров
РАЗРАБОТКА МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМА ВАГОНА
РАСКАЛЕННОГО КОКСА УСТК
Н.А. Александров, Д.Е. Модзелевский, Е.В. Жданов
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СКИПА
ШАХТНОЙ ПОДЪЁМНОЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ
ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ
М. Ю. Борщинский
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ
КРАНОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО И
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ SIEMENS
Е.В. Жданов, Н.А. Александров, Д.Е. Модзелевский
ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЕМ НА БАЗЕ
ПРОГРАММИРУЕМОГО РЕЛЕ ФИРМЫ ОВЕН
В. А. Кубарев, О. Р. Галлямов, А. О. Сарсембин,
Т. В. Богдановская, А. М. Гуров
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОКАТНОГО
ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА ПО СИСТЕМЕ
«ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – СИНХРОННЫЙ
ДВИГАТЕЛЬ»
В.А. Кузнецов, Н.С. Зайцев, Е.С. Кузнецова

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ АДКЗ С ШИП ГЕНЕРАЦИЕЙ СИНУСОИД ПО ПЕРВОЙ ГАРМОНИКЕ
П. Н. Кунинин, М. М. Кучик, А. И. Рыбаков
АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин
СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ
В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин
СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВОЙНЫМ ПИТАНИЕМ В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин
АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ
В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин, Д. А. Маршев77
Секция 2 Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов 85
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВІМ-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ В. В. Грачев, Л. П. Мышляев, Д. Е. Коровин, Г. А. Кулюшин 86
РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА ПРОЦЕССОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ В ШАХТЕ
И. Р. Загидулин, А. С. Саламатин, М. В. Ляховец, Я. И. Пришепа

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПРЕЦЕДЕНТОВ ДЛЯ	
ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ	
ПРЕДСТОЯЩЕЙ ПЛАВКОЙ СТАЛИ	
Р.С. Койнов, С.М. Кулаков, Е.Н. Тараборина1	00
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МИНИ-ТЭЦ В МАТLАВ	
О. В. Кончакова, В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова	08
ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ НА	
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	
С. О. Корнева, Е. С. Кузнецова, В. А. Кузнецов	17
СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО СБОРА ИНФОРМАЦИИ	
ДЛЯ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КОНВЕЙЕРНОГО	
ТРАНСПОРТА	
Д.Е. Коровин, М.В. Ляховец	27
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ	
РАЗРАБОТКИ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ	
Костык А. В., В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова	30
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И	
УЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА	
ПРОИЗВОДСТВЕ НА ПРОМЫШЛЕННОМ	
ПРЕДПРИЯТИИ	
С. А. Кузьмин, Е. С. Кузнецова, В. А. Кузнецов	36
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ	
ДРОБИЛЬНОЙ ВАЛКОВОЙ МАШИНОЙ В АВАРИЙНЫХ	
СИТУАЦИЯХ	
А.Г. Никитин, К.В. Тагильцев-Галета, К.А. Чайников1	45
ПЕРЧАТКА – КОНТРОЛЛЕР С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ	
И. В. Присяжнюк, Д.Е. Модзелевский	51

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА РАСХОДА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
ПРОГРАММЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА
ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ
С. Ю. Романюк, Е. С. Кузнецова, В. А. Кузнецов
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ
СИСТЕМ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АГРЕГАТАМИ НА ПРИМЕРЕ
УГЛЕОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ
А.С. Саламатин, 1Г.В. Макаров, М.М. Свинцов
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
УСТОЙЧИВОСТЬЮ ПЕРЕДОВЫХ ВЫРАБОТОК
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ
В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ И
ЛОКАЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ
Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А. А. Усольцев, А.Р. Михно 179
ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ
ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ
Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А. А. Усольцев, А.Р. Михно 187
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
СВАРКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ НА МАШИНЕ
MCP-63.01
Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А. А. Усольцев, А.Р. Михно,
С.Н. Кратько
МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
КОТЛОВЫМ АГРЕГАТОМ
А.А. Филипас, М.А. Шенделёв, И.М. Тарабукин202
215

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

# ТРУДЫ ДЕВЯТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

#### 25-26 НОЯБРЯ 2020 г.

Под. общ. ред.: д.т.н., проф. Островлянчика В.Ю., к.т.н., доц. Кубарева В.А.

Техническая редакция: Поползин И. Ю.

Компьютерная верстка: Поползин И. Ю.

Подписано в печать 03.12.2020 Формат 60х84 1/16 Бумага писчая Печать цифровая Тираж 50 экз. Усл. печ. л. 12,56 Уч.-изд. л. 12,97 Заказ №226\_\_\_\_\_