

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт вычислительных технологий  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Журавлев Сергей Сергеевич

ИМИТАЦИОННЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ТЕСТИРОВАНИЯ АСУ ТП ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Окольнишников Виктор Васильевич

Новосибирск – 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУ ТП.....</b>	<b>12</b>
1.1. Методы тестирования прикладного программного обеспечения .....	13
1.2. Постановка задачи тестирования АСУ ТП .....	17
1.3. Средства тестирования программ управления АСУ ТП.....	19
1.4. Средства имитационного моделирования технических систем .....	23
1.4.1. Имитационное моделирование.....	23
1.4.2. Развитие имитационного моделирования.....	24
1.4.3. Подходы имитационного моделирования.....	26
1.4.4. Среды имитационного моделирования имитационного моделирования.....	28
1.4.5. Выбор среды имитационного моделирования .....	29
1.4.6. Среда имитационного моделирования MTSS .....	30
1.4.7. Архитектура MTSS .....	30
1.4.8. Обзор имитационных моделей технологических процессов горнодобывающих предприятий .....	32
1.5. Выводы по Главе 1.....	40
<b>ГЛАВА 2. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ.....</b>	<b>41</b>
2.1. Угольная шахта.....	42
2.1.1. Система конвейерного транспорта.....	42
2.1.2. Технологическое оборудование системы конвейерного транспорта.....	42
2.1.3. Система водоотлива .....	44
2.1.4. Технологическое оборудование системы водоотлива.....	44
2.1.5. Технологическое оборудование вспомогательных систем .....	45
2.2. Управление технологическими процессами угольной шахты .....	46
2.2.1. Автоматизированная система контроля и управления технологическим оборудованием угольных шахт .....	46
2.2.2. Описание АСКУ ТО М.....	47
2.2.3. Аппаратное обеспечение АСКУ ТО М.....	48
2.2.4. Прикладное программное обеспечение АСКУ ТО М.....	50
2.2.5. Основные датчики систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты .....	51

2.2.6.	Основные управляющие сигналы АСКУ ТО М систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты .....	52
2.2.7.	Основные контролируемые временные параметры систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты .....	53
2.2.8.	Основные контролируемые временные параметры систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты .....	54
2.2.9.	Команды управления контроллерного и диспетчерского уровней АСКУ ТО М систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты .....	56
2.3.	Модель технологического оборудования в MTSS .....	59
2.4.	Расширенная модель технологического оборудования в MTSS .....	63
2.5.	Имитационные модели технологического оборудования подсистемы подземного транспорта .....	67
2.5.1.	Конвейер .....	67
2.5.2.	Бункер .....	74
2.5.3.	Забой .....	75
2.5.4.	Описание имитационной модели системы конвейерного транспорта .....	75
2.6.	Имитационные модели технологического оборудования подсистемы электроснабжения .....	77
2.6.1.	Генератор .....	77
2.6.2.	Линия электропередачи .....	78
2.6.3.	Трансформатор .....	78
2.7.	Имитационные модели технологического оборудования системы водоотлива .....	78
2.7.1.	Источник водопритока .....	79
2.7.2.	Резервуар .....	79
2.7.3.	Водопровод .....	79
2.7.4.	Насос .....	80
2.8.	Примеры созданных моделей технологических процессов угольной шахты .....	83
2.9.	Выводы .....	84
<b>ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУ ТП .....</b>		<b>85</b>
2.1.	Логическое функционирование комплекса .....	86
2.2.	Структура комплекса .....	88
2.3.	Модификация структуры .....	91
2.4.	Реализация компонентов имитационного программно-аппаратного комплекса ..	94
2.4.1.	Среда передачи данных .....	94

<b>2.4.2. Модули блока преобразования физических сигналов.....</b>	<b>95</b>
<b>2.4.3. Блок дублирования сигналов датчиков .....</b>	<b>97</b>
<b>2.4.4. Программное обеспечение комплекса .....</b>	<b>97</b>
<b>2.5. Методика тестирования алгоритмов управления.....</b>	<b>101</b>
<b>2.6. Режимы функционирования стенда .....</b>	<b>104</b>
<b>2.7. Выводы.....</b>	<b>105</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>106</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>108</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ.....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СРЕДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>133</b>

## **Введение**

Создание автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) для предприятий горнодобывающей промышленности требует не только строгого соблюдения стандартов в этой области, но и выполнения дополнительных мер со стороны изготовителя для обеспечения надежности системы. Ошибки, допущенные на этапе проектирования системы и разработки прикладного программного обеспечения, могут стать причиной задержки ввода АСУ ТП в эксплуатацию, возникновения аварийных ситуаций или сбоев в процессе работы технологического оборудования (ТО).

В связи с этим возникает задача проверки надежности прикладного программного обеспечения АСУ ТП на предприятии изготовителя на всех этапах его разработки. Это позволяет: повысить надежность системы и, соответственно, безопасность технологического процесса; снизить расходы на пуско-наладочные работы и опытно-промышленную эксплуатацию; упростить сопровождение, модернизацию и оптимизацию прикладного программного обеспечения.

Комплексная отладка и тестирование прикладного программного обеспечения АСУ ТП является сложной задачей. Проблема заключается в сложности генерации полного набора согласованных сигналов датчиков ТО и опасности или невозможности создания на реальном объекте ситуаций, выходящих за пределы нормальных режимов технологического процесса.

Для разработки, тестирования и отладки прикладного программного обеспечения АСУ ТП применяют программные и физические имитаторы сигналов, специализированные программно-аппаратные комплексы. Эти средства имеют ограниченные области применения и функциональные возможности. Поэтому создание новых средств комплексного тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности с использованием математических моделей технологических процессов является актуальной задачей.

Основным направлением технологического развития угольной промышленности России до 2030 г. (утв. распоряжением Правительства РФ от

24.01.2012 № 14-р.) в отношении подземного способа добычи полезных ископаемых предусмотрено осуществление мероприятий по разработке и внедрению систем «безлюдной» выемки полезных ископаемых на базе комплексной механизации и автоматизации. В соответствии с прогнозом научно-технического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 г., в состав приоритетных критических технологий отмечены технологии добычи угля без постоянного присутствия людей в рабочем пространстве, внедрение роботизированных комплексов для разработки полезных ископаемых. «Безлюдная» выемка полезных ископаемых неотделимо связана с созданием современных и высоконадежных АСУ ТП.

Диссертационная работа направлена на решение актуальной проблемы - повышения надежности АСУ ТП, от которой зависит уровень безопасности предприятий горнодобывающей промышленности, и относится к приоритетному направлению развития науки, технологии и техники «Информационно-телекоммуникационные системы» и одной из критических технологий «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем» Российской Федерации (утв. указом Президента РФ от 07.07.11 №899).

**Цели и задачи исследования.** Целью диссертационного исследования является исследование и разработка средств комплексного тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности, предназначенных для обеспечения надежности этих систем.

Для достижения этой цели сформулированы и решены следующие научные и практические задачи.

1. Определение требований к имитационному программно-аппаратному комплексу, позволяющему создать среду функционирования контроллеров АСУ ТП идентичную реальной среде по составу и значениям сигналов и диспетчерских команд АСУ ТП.

2. Разработка проблемно-ориентированных имитационных моделей технологического оборудования (ТО) угольной шахты.

3. Разработка имитационного программно-аппаратного комплекса для тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности.

4. Разработка метода тестирования для проверки совместимости прикладного программного обеспечения контроллеров АСУ ТП различной реализации, выполняющих один и тот же набор функций.

5. Разработка методики тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП с использованием имитационного программно-аппаратного комплекса. Применение комплекса в процессе создания и внедрения АСУ ТП угольной шахты.

**Методы исследования** включают в себя: имитационное моделирование, системный анализ, теорию графов, теорию конечных автоматов, теорию вероятностей.

**Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем:**

1. Предложен алгоритм функционирования и взаимодействия модулей программного обеспечения имитационного программно-аппаратного комплекса обеспечивающий сокращение времени имитационного эксперимента.

2. Разработан модифицированный метод полунатурного моделирования («Hardware-In-The-Loop»), позволяющий формировать тождественные внешние воздействия при проверке совместимости прикладного программного обеспечения контроллеров АСУ ТП, выполняющих один и тот же набор функций, и сравнивать ответные реакции проверяемых контроллеров.

3. Созданы имитационные модели ТО, содержащие алгоритмы согласованной генерации сигналов датчиков, управляющих воздействий и команд управления АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности.

**Практическая значимость.**

Имитационный программно-аппаратный комплекс используется в ИВТ СО РАН для разработки, отладки и тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП угольных шахт (подтверждается актом ИВТ СО РАН).

Имитационный программно-аппаратный комплекс применен при разработке прикладного программного обеспечения диспетчерского уровня системы водоотлива шахты Осинниковской для отладки изменений (подтверждается актом ООО «КБ ИНФОРМСИСТЕМ»).

Результаты диссертационного исследования прошли практическую апробацию (подтверждается актом ФИЦ УУХ СО РАН) в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований №18-37-00356 [1].

Результаты диссертационного исследования могут быть применены при разработке новых и модернизации существующих АСУ ТП предприятий горнодобывающей и других отраслях промышленности.

**Основные защищаемые положения.** Основными защищаемыми положениями диссертационного исследования являются:

1. Структура и алгоритм функционирования имитационного программно-аппаратного комплекса тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности.

2. Имитационные модели технологического оборудования системы конвейерного транспорта и системы безопасности угольной шахты.

3. Имитационный программно-аппаратный комплекс тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности.

4. Модифицированный метод полунатурного моделирования («Hardware-In-The-Loop»).

5. Методика тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП с помощью созданного имитационного программно-аппаратного комплекса.

**Личный вклад.** Основные результаты, представленные в диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично. Постановка научных задач исследования сделана д.т.н. В. В. Окольнішниковым. Постановка прикладных задач сформулирована к.ф.-м.н. С. Р. Шакировым.



Публикации [2–7], выполненные автором лично, описывают реализацию имитационного программно-аппаратного комплекса и обзор средств имитационного моделирования.

В публикациях [1,8–22], выполненных в соавторстве, автору принадлежит описание принципов функционирования и структуры имитационного программно-аппаратного комплекса, модифицированного подхода «Hardware-in-the-loop», программных модулей и блоков аппаратной части созданного комплекса, методики применения комплекса и результатов его использования, принципов унификации комплекса, библиотеки моделей технологического оборудования систем конвейерного транспорта, водоотлива, электроснабжения и вентиляции горнодобывающего предприятия, примеров применения этих библиотек, адаптации научных и практических результатов диссертационного исследования к решению исследовательской задачи «разработка алгоритмов управления модуля шагающей крепи» в рамках проекта РФФИ №18-37-00356.

У автора отсутствует конфликт интересов с соавторами по публикациям.

**Достоверность результатов.** Достоверность представленных результатов подтверждается: применением имитационных моделей, проверенных на наборе тестовых примеров; выполнением проверки соответствия имитируемых функций управления требованиям к прикладному программному обеспечению АСУ ТП; подтверждением результатов на этапе опытной эксплуатации имитационного программно-аппаратного комплекса. Разработанное программно-аппаратное обеспечение имитационного программно-аппаратного комплекса и взаимодействие его составных частей проверено на тестовых примерах.

**Представление работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 20 международных конференциях «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека» (Россия, г. Екатеринбург, 2013), «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2015» (Россия, г. Новосибирск), международная конференция по вычислительной и прикладной математике в рамках «Марчуковских научных

чтений» (Россия, г. Новосибирск, 2017) и др., а также на 10 всероссийских конференциях. В полном объеме результаты диссертационного исследования докладывались на семинарах в ИВТ СО РАН, ИАиЭ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН, НГТУ, ИСИ СО РАН.

**Публикации.** По теме диссертационного исследования автором опубликованы 53 печатных работы, в том числе: 4 публикации в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК; 2 публикации проиндексированы в базе данных Web of Science и 5 в базе данных Scopus; 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ; 10 публикаций в рецензируемых научных журналах; 36 публикаций в трудах и тезисах Всероссийских и международных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка (261 наименований) и 3 приложения. Текст диссертации содержит 40 рисунков, 16 таблиц. Объем текста составляет 135 страниц.

В первой главе **«Методы и средства тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП»** выполнен обзор и сравнительный анализ методов и средств обеспечения надежности прикладного программного обеспечения АСУ ТП. Сформулированы требования к создаваемому программно-аппаратному комплексу. Проведено сравнение наиболее известных сред имитационного моделирования технических систем. Выполнен обзор работ в области имитационного моделирования технологических процессов предприятий горнодобывающей промышленности.

Во второй главе **«Имитационные модели технологического оборудования систем угольной шахты»** описана структура угольной шахты, ТО и АСУ ТП, применяемые для контроля и управления этим оборудованием. Рассмотрен процесс разработки МТО, предназначенных для разработки, отладки и тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП. Приведен пример использования созданной библиотеки МТО.

Третья глава «**Имитационный программно-аппаратный комплекс для тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП**» содержит описание структуры имитационного программно-аппаратного комплекса и предложенного усовершенствованного способа тестирования систем автоматизации. Приведена методика тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП систем угольной шахты.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Диссертация выполнена по специальности 05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

**Области исследований:**

1. Модели, методы и алгоритмы проектирования и анализа программ и программных систем, их эквивалентных преобразований, верификации и тестирования (Главы 1,2 и 3, в т.ч. пункты. 1.1, 1.2, 1.4, 2.4, 2.5, 2.7, 2.8, 3.5, 3.6).

2. Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем (Главы 1,2 и 3, в т.ч. пункты 1.2, 1.3, 2.3, 2.4, 3.1-3.6).

## **Глава 1. Методы и средства тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП**

В рамках диссертационного исследования в качестве предприятий горнодобывающей промышленности рассматриваются угольные шахты. В соответствии с федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» [23] они являются опасными производственными объектами, к которым предъявляются повышенные требования к безопасности функционирования технологических процессов. Одним из требований к безопасности в угольных шахтах является надежность функционирования АСУ ТП.

Ключевым элементом, обеспечивающим надежность функционирования современных АСУ ТП, является прикладное программное обеспечение, входящее в состав модулей ввода и вывода, программируемых логических контроллеров и систем диспетчерского управления (SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных).

В основном эти устройства содержат в своем составе микроконтроллеры, обеспечивающие обработку входных сигналов датчиков, формирование соответствующих управляющих сигналов и связь со SCADA. В процессе производства таких устройств или разработки для них программного обеспечения необходимо обеспечивать выходной контроль продукции. Это позволяет выявить разного рода сбои, ошибки конфигурирования и обеспечить стабильность заявленных характеристик. Если заявленные электрические характеристики нового устройства могут быть проверены с помощью измерительных приборов, то верификацию прикладного программного обеспечения это сделать весьма затруднительно. Сложность заключается в необходимости создания согласованного набора тестовых сигналов. Процесс создания такого набора зависит от человеческого фактора и является трудоемким.

Структура АСУ ТП разделяется на три уровня: диспетчерский, контроллерный, датчиков. В рамках диссертации рассматривается прикладное

программное обеспечение для диспетчерского и контроллерного уровней. Диспетчерский уровень реализует мониторинг и управление технологическим процессом и содержит SCADA. Контроллерный уровень (уровень программируемых логических контроллеров), с помощью программируемых логических контроллеров, обеспечивает местное автоматизированное управление, реализацию локальных команд на пульте управления контроллера (например, нажатие кнопок на пульте управления контроллера) и команд диспетчерского уровня, автоматическую обработку сигналов датчиков ТО.

Ошибки в прикладном программном обеспечении АСУ ТП могут приводить: на этапах пуско-наладки и опытной эксплуатации к увеличению сроков и стоимости ввода системы автоматизации в работу; на этапе эксплуатации к возникновению аварийных ситуаций.

В связи с этим возникает задача проверки надежности прикладного программного обеспечения АСУ ТП на предприятии изготовителе. Это позволит: повысить безопасность при работе системы; снизить расходы на пуско-наладку и опытно-промышленную эксплуатацию системы; упростить сопровождение, модернизацию и оптимизацию программ управления.

Основными характеристиками надежности программного обеспечения являются – устойчивость к отказам, соответствие стандартам и способность к восстановлению. Контроль надежности прикладного программного обеспечения в первую очередь основан на верификации алгоритмов управления.

### **1.1. Методы тестирования прикладного программного обеспечения**

Для верификации алгоритмов программ применяют методы: формальные, динамические, синтетические, экспертные, статистический анализ [24–29].

Теоретические основы верификации [30] программного обеспечения сформулированы и развиваются учеными: Липаев В.В. [31], Кулямин В.В. [24], Камкин А.С. [32–34], Захаров В.А. [35], Евстигнеев В.А. [36], Круглов М.Г. [37], Царьков Д.В. [38], Леман М.М. [39], Куликов С.С. [40], Непомнящий В.А. [41–43], Вирбицкайте И.Б. [44], Андерсон Р. [45], Кузьмина Е.В. и Соколова В.А. [46–48],

Бейбер Р.Л. (Baber R.L.) [49], Бейзер Б. (Beizer B.) [50], Майерс Г. Дж. (Myers G.J.) [51], Krämer A. [52], и др.

### **Формальные методы верификации алгоритмов программ**

К формальным методам верификации относятся дедуктивный анализ, проверка моделей, проверка согласованности. Формальные методы предназначены для решения задачи верификации алгоритмов программ методами, допускающими выполнение автоматической оценки корректности программ. Эти методы основаны на использовании формализмов для представления алгоритмов – сетей Петри, временных автоматов, схем последовательных функций, диаграммы состояний, диаграммы UML и др. В последствии, преобразованные алгоритмы могут исследоваться соответствующими методами на отсутствие противоречивых событий, бесконечных циклов и т.п.

### **Динамические методы верификации алгоритмов программ**

К динамическим методам верификации относятся мониторинг и тестирование (имитационное тестирование). Динамические методы применяются в случае, когда сложно или невозможно применить формальные методы.

Мониторинг представляет собой наблюдение и анализ формируемых выходных сигналов программы управления.

Тестирование предусматривает дополнительные внешние воздействия на ход эксперимента и применение в качестве источника входных сигналов имитационной модели, которая осуществляет имитацию входных сигналов.

### **Синтетические методы верификации алгоритмов программ**

К синтетическим методам верификации относятся тестирование на основе моделей, мониторинг формальных свойств, статистический анализ формальных свойств (проверка правил корректности, поиск дефектов по шаблонам), синтетические методы структурного тестирования. Формальные методы относятся с синтетическим.

## **Экспертные методы верификации алгоритмов программ**

Экспертиза бывает общая и специализированная. Общая экспертиза может быть в виде технического аудита, сквозного контроля, инспекции или аудита. Специализированная экспертиза заключается в выполнении организационной экспертизы, экспертизы удобства использования, экспертизы защищенности, анализа свойств архитектуры.

Применение формальных и синтетических методов предусматривает создание аналитических моделей, что для сложных программных систем является трудно выполнимой задачей. Использование экспертизы зависит от квалификации соответствующего персонала и требует постоянного присутствия эксперта (это особенно затруднительно, если в программу постоянно вносятся изменения и дополнения).

Динамические методы верификации включают в себя: мониторинг и тестирование реальной программы и/или ее математической модели. Преимуществами использования математической модели программы являются: безопасность выполнения, повторяемость и возможность автоматизации экспериментов. Сложность использования математической модели заключается в необходимости проверки соответствия модели реальной программе.

### **Подход «модельно-ориентированного проектирования» алгоритмов программ**

В настоящее время активно развивается подход «Модельно-ориентированное проектирование» МОП (модельно-ориентированное проектирование, англ.: model-based design approach) предложенный сотрудниками The MathWorks, Inc. заключающийся в организации контура тестирования, в котором испытуемый объект функционирует в среде идентичной реальному процессу, с точки зрения входных сигналов [53]. Подход основан на использовании математических моделей, имитирующих протекание технологического процесса под управлением АСУ ТП [54,55]. Математические модели используются для формирования наборов тестовых данных. Эти модели являются спецификацией проектируемой

системы, которая актуализируется во время выполнения разработки. Данная спецификация позволяет выполнить анализ корректности и возможности выполнения требований посредством моделирования [56].

Применение подхода МОП обеспечивает повышение надежности создаваемых программных, аппаратных и программно-аппаратных систем [57]. Появлению этого подхода предшествовали этапы становления общей теории систем, создание CASE (Computer-Aided Software Engineering) – совокупность средств автоматизации разработки программного обеспечения, разработка языка UML (Unified Modeling Language) в 1990х годах, обеспечивающего проектирование систем на разных уровнях абстракций и появление в 2001 году MDA (Model Driven Architecture) [58].

Подход МОП основан на применении концепции «in-the-loop testing» [55]. Существуют следующие основные методы тестирования на базе подхода МОП [59], в которых в качестве объекта тестирования может выступать: модель - Model-in-the-loop (MiL), программное обеспечение - Software-in-the-loop (SiL), прототип устройства - Processor-in-the-loop (PiL), готовое устройство (полунатурное моделирование) - Hardware-in-the-loop (HiL). В методе HiL используется система целиком или ее компонент (данный метод применяется для организации приемочных тестов оборудования). Как правило, подход МОП используется совместно с «V-подходом» разработки программного обеспечения [60].

Подход МОП получил широкое распространение, особенно в сфере автоматизации, его применяют известные во всем мире компании: Ford [61], Tesla [62], Festo [63] и др. Так же подход МОП или его элементы (MiL, SiL, PiL, HiL, отдельно или совместно в разных комбинациях) активно применяется исследователями, например, в: разработке генератора случайных чисел [64]; одновременном применении методов SiL и HiL для разработки программного обеспечения манипуляторов для роботов [65]; моделировании канала связи командно-измерительной системы космического аппарата [66]; модельно-ориентированном проектировании системы автоматического управления температурой с циркуляцией промежуточного теплоносителя [67]; разработке



системы управления электроприводом на основе метода модельно-ориентированного программирования [68]; быстром прототипировании систем управления как части модельно-ориентированной разработки теплового насоса сушилки [69]; управлении встроенной моделью в полунатурном моделировании для промышленных беспроводных сетей предприятий с применением WirelessHART стандарта [70], разработке сервиса задания сценариев предъявления стимулов с использованием модельно-ориентированного подхода [71], и др.

## 1.2. Постановка задачи тестирования АСУ ТП

Для формирования наборов тестовых данных в работе применены методы тестирования, основанные на использовании математических моделей технологических процессов и прикладного программного обеспечения АСУ ТП.

Математическая модель технологического процесса формирует цифровые аналоги сигналов датчиков и выполняет интерпретацию управляющих воздействий АСУ ТП.

Математическая модель прикладного программного обеспечения АСУ ТП представляет собой множество математических моделей алгоритмов управления технологическим оборудованием и их взаимодействием между собой. Эта модель формирует цифровые аналоги управляющих воздействий и команд управления системы автоматизации, выступает в роли эталона при тестировании прикладного программного обеспечения реальной АСУ ТП.

Задачу тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности можно формализовать указанным ниже способом.

Алгоритмы функционирования программ и ТО можно описать с помощью конечных автоматов. Ниже приведено формализованное представление модели прикладного программного обеспечения АСУ ТП (1), входного (2) и выходного (3) алфавитов конечного автомата:

$$FSM = \{S, S_0, A, Y, g, F\}, \quad (1)$$

где  $FSM$  – конечный автомат, описывающий функционирование моделируемого объекта (технологического оборудования, технологического процесса, прикладного программного обеспечения),  $S$  – состояния имитационной модели ТО,  $S_0$  – начальное состояние, формирующееся при запуске имитации,  $A$  – входной алфавит автомата;  $Y$  – выходной алфавит;  $g$  – функция переходов;  $F$  – конечные состояния.

$$A_i = \{ASENSOR_i, DSENSOR_i, CONTRLCOM_i, BUTTONCOM_i\}, \quad (2)$$

где  $A_i$  – входной алфавит на  $i$ -ом шаге,  $ASENSOR_i = \{as_{i1}, as_{i2}, \dots, as_{in}\}$  – значения сигналов аналоговых датчиков на  $i$ -ом шаге;  $DSENSOR_i = \{ds_{i1}, ds_{i2}, \dots, ds_{im}\}$  – значения сигналов дискретных датчиков на  $i$ -ом шаге;  $CONTRLCOM_i = \{cc_{i1}, cc_{i2}, \dots, cc_{il}\}$  – команды управления диспетчерского уровня на  $i$ -ом шаге;  $BUTTONCOM_i = \{bc_{i1}, bc_{i2}, \dots, bc_{ik}\}$  – команды управления контроллерного уровня.

$$Y_i = \{OUTSIG_i, REPCOM_i\}, \quad (3)$$

где  $Y_i$  – выходной алфавит на  $i$ -ом шаге;  $OUTSIG_i = \{os_{i1}, \dots, os_{iz}\}$  – состояние управляющих сигналов АСУ ТП на  $i$ -ом шаге;  $REPCOM_i = \{rc_{i1}, \dots, rc_{iw}\}$  – ответ на команды управления диспетчерского уровня на  $i$ -ом шаге.

Тестирование прикладного программного обеспечения АСУ ТП можно осуществить следующими методами: экспертная оценка корректности функционирования; сравнение управляющих воздействий от тестируемой системы с эталонными сигналами, генерируемыми либо имитационным программно-аппаратным комплексом, либо заведомо корректно функционирующей АСУ ТП; подача некорректных входных сигналов для выявления реакции тестируемой системы на ошибочное или аварийное состояние ТО.

Для реализации функции тестирования необходимо обеспечивать генерацию тестовых наборов сигналов (4).

$$T_i = \{S_i, C_i, \tau_i\}, \quad (4)$$

где  $T_i$  –  $i$ -я тестовая последовательность сигналов;  $S_i$  –  $i$ -е множество состояний сигналов датчиков;  $C_i$  –  $i$ -е множество команд управления;  $\tau_i$  – длительность  $i$ -го состояния;  $i$  – порядковый номер тестового набора данных, в котором  $i = 0 \dots n$ ;  $n$  – количество тестовых наборов данных;  $T_{i=0}$  – набор сигналов, задающий начальное состояние системы,  $T_{i=1 \dots (n-1)}$  – наборы сигналов,

приводящие систему к тестовому состоянию,  $T_{i=n}$  – набор сигналов на входе системы, находящейся в тестовом состоянии.

Для организации тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП необходимо реализовать возможность информационного и физического обмена сигналами с тестируемой системой. Это обеспечит режим функционирования АСУ ТП как на реальном объекте.

### **1.3. Средства тестирования программ управления АСУ ТП**

Существующие средства тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП подразделяются на имитаторы сигналов, на основе физических моделей, имитаторы цифровых сигналов и специализированные комплексы.

Недостатками имитаторов на основе физических моделей являются сложность изготовления, необходимость постоянного контроля технического состояния с целью поддержания заданных параметров и обеспечения безотказной работы физической модели. Имитация некоторых аварийных ситуаций на таких имитаторах сложно реализуема.

Имитаторы сигналов обладают следующими недостатками: не позволяют выполнять автоматизированное тестирование, не позволяют тестировать несколько параллельно протекающих событий, не обладают возможностью в простой форме задавать взаимосвязанные сигналы.

Математическое моделирование позволяет избежать недостатков физических имитаторов и имитаторов сигналов. Для разработки моделей технологических процессов можно применять интегрированные средства специализированных программно-аппаратных комплексов или внешние среды моделирования.

Специализированные средства представляют собой программно-аппаратные комплексы (WinMod [72], MiMiC [73], APROS [74], xPC Target [75], комплекс средств тестирования National Instruments [76], SIMIT [77], ТРОПА [78], РИТМ [79], SimInTech [80], Полигон СибГИУ [81], Комплекс виртуальных лабораторных стендов ИАиЭ СО РАН [82], Автоматизированный стенд для испытания систем

управления ракетно-космических стартовых комплексов [83] и др.), реализующие генерацию тестовых сигналов на основе проблемно-ориентированной математической модели технологического процесса или целого предприятия. Использование математического моделирования позволяет реализовать согласованную генерацию сигналов датчиков и управляющих сигналов и избежать недостатков присущих имитаторам сигналов. Сравнительные характеристики комплексов приведены в таблице 15 (Приложение А).

В области теории создания специализированных программно-аппаратных комплексов известны работы следующих отечественных и зарубежных ученых: Окольников В.В. [84]; Мышляева Л.П. [85]; Ивушкина А.А. [81]; Островляничка В.Ю. [86]; Золотухина Ю.Н. [87–89]; Зюбина В.Е. [82,90–94]; Ноженковой Л.Ф. [95]; Захарченко В.Е. [96]; Бабаяна Р.Р. [97]; Айзатулина А.И. [98,99]; Бабенко А.Г. [100]; Маслова А.А. [101–103]; Негоды В.Н. [104]; Громакова Е.И. [105–108]; Sang C. Park, Wang G.N. и др. [109,110]; Ledin J.A. [111]; Ryssel U., Ploennigs J. и Kabitzsch K. [55]; Erkkinen T. и Mirko C. [53]; Dogan Fennibay, Arda Yurdakul и Alper Sen [112]; Olaf Maibaum [113]; Oliver Meister, Natalie Frietsch, Justus Seibold, and Gert F. Trommer [114]; и др.

Окольничниковым В.В. предложена реализация модельной проверки алгоритмов АСУ ТП Северо-Муйским тоннелем, обеспечивающая идентичность модельных и реальных программ.

В работах Мышляева Л.П., Ивушкина А.А., Островляничка В.Ю. рассматривается теория и процесс разработки натурно-модельных отладочных комплексов и создание на их основе АСУ ТП горнодобывающих предприятий.

Золотухин Ю.Н. с коллегами создал АСУ ТП для метрополитена и отладочный комплекс, позволяющий выполнять наладку новых проектов без необходимости установки на объектах.

Зюбин В.Е. предложил концепцию виртуального объекта управления и развил применение гиперпроцессов для разработки алгоритмов и управляющих программ.

Ноженковой Л. Ф. предложена реализация комплекса отладки программ управления для космической отрасли.

Захарченко В.Е. в своих работах рассматривает создание комплекса отладки программ управления с использованием среды моделирования AnyLogic и промышленных логических контроллеров Siemens.

Бабаян Р.Р. описывает создание и структуру комплекса для отладки ПО бортовой авиационной аппаратурой.

Айзатулина А.И. разработал комплекс для создания, отладки и тестирования систем управления АЭС на основе проектных данных.

Бабенко А.Г. реализовал программный комплекс для отладки и тестирования проектов с использованием моделей, созданных в среде MATLAB, и программ управления, разработанных в программе CoDeSys. Организовано взаимодействие этих продуктов и тестового контроллера с помощью OPC (аббр. от англ. Open Platform Communications) технологии [115].

Ряд работ Маслова А.А. посвящены созданному комплексу на основе среды моделирования AutoCont, аппаратных средств фирмы Advantech, промышленных компьютеров и физических моделях технологических процессов.

Негода В.Н. рассматривает тестирование логических программ управления для оптимизации процессов прототипирования и автоматизации тестирования прототипов.

Громаков Е.И. применяет автоматные модели алгоритмов управления для разработки математического и программного обеспечений АСУ ТП, методологии создания тренажеров операторов в нефтегазовой отрасли.

Sang C. Park, G.N. Wang и др. Разработали программно-аппаратный комплекс PLCStudio позволяющий задавать программы управления на графическом стандартизированном языке программирования контроллеров, содержит среду моделирования с логическим имитатором и человеко-машинный интерфейс оператора.

Jim A. Ledin исследует в своих работах полунатурное моделирование.

Uwe Ryssel, Joern Ploennigs и Klaus Kabitzsch исследуют итеративную

разработку программ управления с применением полунатурного моделирования.

Erkkinen Т. и Mirko С. рассматривают принципы модельно-ориентированного проектирования программ управления с применением MATLAB.

Dogan Fennibay, Arda Yurdakul и Alper Sen описывают реализацию режима реального времени для генерации сигналов с частотой до 10 кГц на основе передачи данных в комплексе тестирования по сети Ethernet.

Maibaum О. сравнивает методы модельно-ориентированного проектирования.

Группа ученых (Oliver Meister, Natalie Frietsch, Justus Seibold, and Gert F. Trommer) создала алгоритм управления квадрокоптером с использованием метода SiL подхода модельно-ориентированного проектирования.

Универсальные специализированные программно-аппаратные комплексы продаются “под ключ” и имеют широкие функциональные возможности, но область их применения ограничена составом библиотек моделей технологического оборудования. Некоторые из таких комплексов содержат набор базовых элементов для построения моделей технологического оборудования или процессов, однако функционально такие наборы могут решить ограниченное количество задач моделирования.

Специализированные программно-аппаратные комплексы направлены на решение отдельных задач и, как правило, не позволяют создавать модели для других предметных областей.

На основе обзора и в соответствии с целью и задачами работы сформулированы требования к структуре имитационного программно-аппаратного комплекса, в который должны входить:

1. Имитационные модели систем угольной шахты, моделирующие значения сигналов датчиков ТО. Модели должны обеспечивать имитацию технологических ситуаций (например, пуск и остановка конвейера) и воспроизводить заданные сценарии работы ТО.

2. Имитационная модель прикладного программного обеспечения АСУ ТП, формирующая управляющие воздействия, команды управления диспетчерского и контроллерного уровней имитируемой системы.

3. Среда функционирования АСУ ТП полностью идентичная реальной с точки зрения внешних сигналов. Среда формирует электрические аналоги сигналов датчиков ТО на основе модельных данных систем конвейерного транспорта и водоотлива.

4. Интерфейсный уровень, формирующий управляющие воздействия АСУ ТП и сигналы датчиков ТО, имитирующий обмен данными между уровнем контроллеров и диспетчерской системой.

#### **1.4. Средства имитационного моделирования технических систем**

Решение задачи моделирования сигналов датчиков и управляющих сигналов технологического процесса для тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП с помощью аналитических методов затруднительно. В этом случае применение имитационного моделирования является более эффективным, а иногда и единственным методом исследования. Созданный имитационный программно-аппаратный комплекс содержит дискретно-событийные имитационные модели технологических процессов угольной шахты.

##### **1.4.1. Имитационное моделирование**

Современные объекты управления обладают высокой степенью сложности (структурной, функционирования, выбора поведения и развития) [116], что значительно затрудняет использование аналитических методов исследования. В этом случае применение имитационного моделирования (ИМ) является более эффективным [117–119]. В качестве примера можно привести работу [96], в которой осуществляется проверка алгоритмов АСУ ТП гидроэлектростанции. Место имитационного эксперимента в структуре способов исследования систем отображено на рисунке 1.

Имитационное моделирование представляет собой процесс создания имитационной модели и обеспечение ее функционирования во времени. Имитационная модель является описанием зависимостей между входами и

выходами исследуемого объекта с помощью алгоритма, описывающего внутреннее развитие процессов, причем способы формализации взаимосвязей могут быть произвольными.

Развитие отечественной теории имитационного моделирования принадлежит Бусленко Н.П., Марчуку Т.И., Глушкову В.М., Коваленко И.Н., Моисеева Н.Н. и др. [120,121]. За рубежом значительный вклад в исследование сложных систем и разработку теории управления внесли ученые: Саати Т., Нейлор Т., Форрестер Дж., Шеннон К., Месарович М., Мако Д., Такахара И., Лоу А.М., Кельтон В. Д. и др.

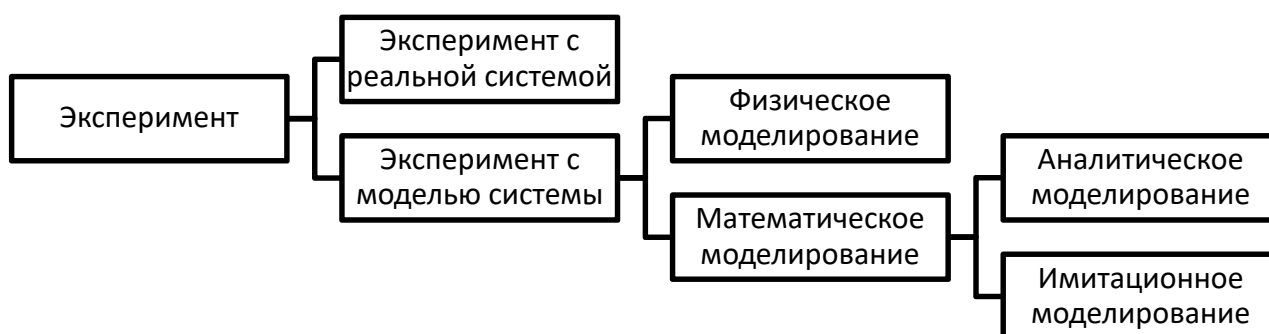


Рисунок 1. Способы исследования систем

#### 1.4.2. Развитие имитационного моделирования

Развитие ИМ началось в середине 60-х гг. XX в. [122] с использования универсальных языков программирования (FORTRAN) и метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Дальнейшее развитие связано с новой методологией разработки моделей - создание подпрограмм, которые реализуют выполнение часто используемых операций и позволяют сократить время разработки моделей.

В 1961 г. появился специализированный язык ИМ GPSS. Дальнейшее развитие было связано с разработкой специализированных языков дискретно-событийного (SIMSCRIPT, Q-GERT, SIMULA, SLAM, GASP IV, SIMAN) и непрерывного (CSMP III, CSSL III, CSSL IV, ASCL, DARE-P) моделирования. Основным недостатком использования таких инструментов является необходимость применения специализированного языка.

В 90-х гг. XX в. началось развитие универсальных и специализированных сред ИМ, обусловленное быстрым развитием персональных ЭВМ. Новое



поколение сред ИМ (Arena, Extend и др.) позволило разрабатывать и проводить имитационные эксперименты без знания специализированных языков. К концу 90-х гг. XX в. были разработаны специализированные среды имитационного моделирования, отличающиеся от универсальных сред наличием библиотек и шаблонов элементов производственных систем. К 2000 г. было создано более 50 сред ИМ [123].

Начавшееся в 90-х гг. развитие анимации процесса имитации с помощью сред моделирования получило в начале нового тысячелетия мощный толчок. Активно развивающееся направление визуализации – трехмерная анимация, оказало значительное влияние на представление процесса и результатов моделирования. Современные среды, в большинстве, обладают возможностью трехмерной анимации.

В России активное использование универсальных и специализированных сред ИМ для персональных ЭВМ началось в конце XX в. Этому способствовали следующие факторы.

1. Проведение регулярных всероссийских научных мероприятий по ИМ. В октябре 2003 г. состоялась первая всероссийская конференция по имитационному моделированию ИММОД, проводимая раз в два года.

2. Создание портала GPSS [124], содержащего информацию о литературе и мероприятиях по ИМ.

3. Появление современной литературы и материалов конференций (ИММОД, МОДС, Winter Simulation Conference и др.), находящихся в свободном доступе.

4. Разработка отечественной универсальной среды имитационного моделирования AnyLogic фирмой "XJ Technologies".

В работе [125] приведен график сравнительного роста числа российских и зарубежных организаций, пользующихся услугами компании "XJ Technologies". В период с 2000 по 2007 гг. доля российского рынка "XJ Technologies" увеличилась более чем на 25 % от всех заказов компании на имитацию систем. Наибольший интерес к применению имитационных моделей отмечается в логистике, производстве и бизнесе.

Основными факторами, ограничивающими развитие ИМ, являются нехватка квалифицированных кадров и использование неэффективных инструментов (MS Excel) [125]. Среди частных проблем можно отметить [126] неоптимальную разработку имитационных моделей, отсутствие эффективной машинной реализации, несоблюдение компромисса между универсальностью и прикладной областью.

### **1.4.3. Подходы имитационного моделирования**

В настоящее время в имитационном моделировании существуют следующие подходы [3,127]:

- динамическое моделирование;
- метод статистических испытаний (метод Монте-Карло);
- системная динамика;
- дискретно-событийный;
- агентное моделирование;
- смешанное моделирование.

Динамическое моделирование рассматривает динамические системы (механические или физические процессы, системы управления), которые описываются алгебраическими и дифференциальными уравнениями и блок-схемами.

Системная динамика (СД) разработана в 60-х гг. XX в. Дж. В. Форрестером. Системно-динамический подход представляет собой мощный инструментарий для исследования динамических процессов, направленный на изучение сложных систем с обратной связью (производственные, социально-экономические и др.) [128]. Процессы представляются в виде диаграммы, состоящей из петель положительной и отрицательной обратной связи. Главное внимание уделяется моделированию обратных связей.

Результатом моделирования СД-модели является выявление глобальных зависимостей и причинно-следственных связей в исследуемой системе.

Дискретно-событийный (ДС) подход разработан в начале 60-х гг. XX в. Дж. Гордоном. В отличие от СД модельное время продвигается либо от события к событию, либо через дискретные промежутки времени. Дискретно-событийный подход применяется в случае, если можно считать, что переменные системы изменяются мгновенно в определенные моменты времени. Для представления ДС-моделей применяется методология событийного графа [129].

Дискретно-событийное моделирование наиболее распространенный подход ИМ, сфера его применения очень обширна: логистика, социально-экономические процессы, промышленность и др.

Развитие идей агентного моделирования началось в 70-х гг. XX в., но как подход сформировался в 90-х гг. XX в. Основой агентного моделирования является понятие “агент” - некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, которая может принимать “решения” в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться [127]. Ключевыми элементами агентного моделирования являются карты состояний. Агентное моделирование применяется для имитации интеллектуальных, децентрализованных и распределенных систем с целью получения сведений о влиянии на систему функционирования и взаимодействия элементов.

Метод Монте-Карло - численный метод решения математических задач с помощью моделирования случайных величин [130], разработанный в 1949 г. Дж. Нейманом и С. Улама. Метод статистических испытаний позволяет моделировать процесс, на протекание которого оказывают влияние случайные факторы.

Сущностью метода Монте-Карло является применение какого-либо генератора распределения вероятностей параметра изучаемого процесса [14]. После определения функции на основе теоретического, эмпирического или другого распределения, соответствующего характеру изучаемого процесса, производятся случайные выборки, представляющие значения входных данных. С помощью множественных прогонов имитационной модели получается соответствие

множеств значений входных и выходных параметров. На заключительном этапе осуществляется принятие решений с помощью статистического анализа выходных данных.

Средства тестирования должны обладать инструментами разработки имитационных моделей и тестовых сценариев – это позволит проверить достижимость состояний конечного автомата имитационной модели прикладного программного обеспечения АСУ ТП.

Технологическое оборудование предприятий горнодобывающей промышленности и алгоритмы прикладного программного обеспечения АСУ ТП характеризуются дискретностью своего функционирования. Соответственно закономерным является применение метода дискретно-событийного моделирования. В этом случае состояние моделируемой системы описывается системой уравнений (5), предложенной в работе [131].

$$\begin{cases} A(t_i) = f(S(t_{i-1}), A(t_{i-1}), t_i) \\ Y(t_i) = g(S(t_{i-1}), A(t_{i-1}), t_i) \end{cases} \quad (5)$$

где  $A(t_i)$  и  $A(t_{i-1})$  – состояние входов системы в момент времени  $t_i$  и  $t_{i-1}$ ,  $S(t_{i-1})$  – состояние системы на предыдущем шаге моделирования,  $t_i$  – текущий момент модельного времени,  $t_{i-1}$  – предшествующий текущему момент модельного времени,  $f$  – функция входов системы,  $Y(t_i)$  – состояние выходов системы на текущем шаге моделирования,  $g$  – функция выходов системы.

#### **1.4.4. Среды имитационного моделирования имитационного моделирования**

Имитационное моделирование может успешно применяться в исследовании производственных систем. Например, имеется опыт использования программных продуктов имитационного моделирования в горном деле, машиностроении, теплофизике и энергосберегающих технологиях [132,133].

Задачи, решаемые ИМ для исследования производственных систем, можно разделить на три основные группы [117]: определение потребности в оборудовании, оценка производительности, оценка технологических операций.

Для решения исследовательских задач с помощью имитационного моделирования можно применять:

- универсальные языки программирования (Java, С и др.);
- программы расчета формул (Excel, MathCad и др.);
- универсальные системы моделирования (MathLab, AnyLogic, MTSS и др.);
- специализированные (Automod, Promodel, MineFrame и др.).

В конце 90-х годов XX в. появилось большое количество специализированных и универсальных сред имитационного моделирования. Это способствовало отказу большинства исследователей от применения универсальных языков программирования.

В настоящее время существует большое количество разных сред имитационного моделирования. В работе [134] приведены сравнительные характеристики более 50 современных сред ИМ. В [135,136] с использованием материалов конференции Winter Simulation Conference за 2005, 2008 гг. проведено сравнение количества и общего объема публикаций о средах ИМ. На основе данных этих источников можно считать, что одними из наиболее распространенных сред являются:

- Arena [137–139], Extend [140–142], AnyLogic [143,144] (универсальные среды);
- AutoMod [145–147], Promodel [148,149] (специализированные).

Данный список для полноты рассмотрения можно дополнить следующими программами: MathCad [150], MATLAB [151], MineFrame [152], MTSS [153]. Сравнительные характеристики приведены в таблице 16 (Приложение Б).

Универсальные языки не рассматриваются, так как при их использовании исследователю необходимо заниматься разработкой среды моделирования.

#### **1.4.5. Выбор среды имитационного моделирования**

Проведен обзор существующих программных средств имитационного моделирования (MathCad, MATLAB, Arena, ExtendSim, AnyLogic, GPSSWorld, Automod, Promodel, MineFrame, MTSS и др.).

В работе [117] предложены критерии для выбора среды имитационного

моделирования, включающие требования к основным характеристикам программного обеспечения, оборудованию, функциональным возможностям, поддержкой пользователя, визуализация результатов экспериментов.

Анализируя результаты сравнения сред ИМ, можно констатировать, что среда имитации технических систем должна обладать развитым набором стандартных библиотек; возможностью создавать пользовательские библиотеки и шаблоны; связью с внешними приложениями; трехмерной анимацией для четкого представления процесса имитации; возможностью использования нескольких подходов или их комбинации для обеспечения максимальной гибкости моделирования; поддержкой иерархии для имитации сложных систем; развитыми средствами документации, анализа и оптимизации. Необходимо также выделить две особенности: поддержка средой моделирования наиболее распространенных операционных систем и разработка интерфейса для пользователя модели.

В рамках задачи диссертационного исследования есть дополнительное требование к среде имитационного моделирования - возможность функционального расширения программы.

Для разработки имитационных моделей технологического оборудования (МТО) и подсистем угольной шахты выбрана среда имитационного моделирования MTSS [154].

#### **1.4.6. Среда имитационного моделирования MTSS**

MTSS (Manufacture and transportation system simulation – среда имитационного моделирования производственных и транспортных систем) – визуально-интерактивная среда дискретно-событийного имитационного моделирования, разработана Рудометовым С.В. в ИВТ СО РАН.

#### **1.4.7. Архитектура MTSS**

Архитектура MTSS приведена на рисунке 2 [13,154]. Для разработки и сопровождения среды и библиотек применяются платформа Eclipse IDE и универсальный язык программирования Java. Архитектура MTSS содержит:

- библиотеки МТО, элементы которых являются имитационными моделями технологического оборудования или вспомогательными модулями для создания моделей технологических процессов;
- статистическую машину, выполняющую сбор информации, генерируемой элементами библиотеки;
- имитационную машину, организующую продвижение модельного времени и взаимодействия между элементами библиотеки;
- модуль баз данных, обеспечивающий взаимодействие с базами данных и связь с внешними приложениям;
- условное графическое обозначение библиотечных элементов, которое может быть двухмерным (применяется на этапе разработки модели системы и схематически визуализирует результаты имитационного эксперимента) и/или трехмерным;
- модуль управления библиотечными элементами, позволяет задавать команды для библиотечного элемента через графический интерфейс MTSS.



Рисунок 2. Архитектура MTSS

#### **1.4.8. Обзор имитационных моделей технологических процессов горнодобывающих предприятий**

Первые результаты моделирования в области горнодобывающей промышленности появились в 1961 году и связаны с публикацией Риста Карстена [155]. В описанной работе модель молибденовой шахты, расположенной в Колорадо (США) имитирует 8 часовую рабочую смену за 30 секунд.

В 1963 году опубликованы первые работы посвященные моделированию с помощью метода Монте-Карло подземной транспортировки угля локомотивами в угольных шахтах Пенсильвании [156].

В 1964 опубликовано продолжение работы Риста, в которой он имитирует 44000 часов производственного времени той же шахты за  $6 \frac{2}{3}$  часа [157]. А также другие публикации, связанные с имитацией транспортных потоков, с применением языков программирования FORTRAN и GPSS.

С 1965 года и далее происходит в основном изучение транспортных потоков, языков программирования и моделирования, а так же, их производных.

После 1970 года появляются первые работы по моделированию грузопотока от забоя до поверхности (цикл – добыча, транспортировка, дробление, хранение) [158].

В 1975 году появляется первая специализированная программа моделирования SIGUT [159]. Далее в 1976 появляется TRANSIM II, в 1977 – BELTSIM, GPSS V.

В 1978 году расширяется круг исследовательских задач и рассматриваются такие как усовершенствование плана эвакуации [160].

Далее происходит бурное развитие систем моделирования и расширение задач [161]. Появляются новые системы имитационного моделирования: Simula, OPMHS, GASP IV. Изучаются различные аспекты подсистем горнодобывающих предприятий – менеджмент предприятия, системы транспортировки, системы добычи и др.



В 1994 году с появлением пакета программного обеспечения PROOF Animation у исследователей появляется мощный инструмент для анимации процесса моделирования.

В 1997-2000 годах появляется большое количество новых систем имитационного моделирования, позволяющих разрабатывать модели без знания специализированного языка.

По настоящее время происходит развитие сред имитационного моделирования, расширение круга задач и исследование ранее недоступных, в связи с ограничениями по вычислительной мощности и функциональным ограничениям сред. Появляются такие системы имитационного моделирования, как MineFrame [152], позволяющие осуществлять моделирование не только технологического процесса, но и моделирование геологической обстановки горнодобывающего предприятия.

В настоящее время существуют работы в области имитации технологических процессов угольных шахт, которые рассматривают моделирование отдельных подсистем. К основным моделируемым процессам и системам можно отнести - гео- и газодинамику, транспортирование продукции, функционирование очистных выработок, водоотлив, а также статистический анализ динамики развития системы в целом.

### **Дальнее зарубежье**

Работы известного зарубежного исследователя Стургула Д.Р. (Sturgul J. R.) связаны с применением языка программирования GPSS для исследования технологических процессов добычи и транспортировки угля. Им выпущена книга [162], в которой рассматривается около 30 разных примеров имитации технологических процессов горнодобывающих предприятий. Его работы охватывают такие области как выбор соответствующего оборудования для конкретных условий предприятия [163], выбор оптимальных условий работы дробилок [164] и др.

Другие зарубежные исследователи не так широко известны. Вагенас Н. (Vagenas N.) осуществлял имитационное моделирование подземных работ с применением специализированных сред, таких как AutoMod [165,166]. Панашйоту Г.Н. (Panagiotou G.N.) осуществил интегрированный мониторинг шахты [167] и разработал систему моделирования для целей планирования и анализа систем совковых экскаваторов в открытых шахтах и карьерах [168].

Грей Дж. Дж. в своей работе осуществил имитацию процесса подземной добычи угля от забоя до склада на поверхности [169].

В работе Гайкаман Г. Дж. (Giacaman J. G.) и др. рассмотрено моделирование грузопотоков и процессов погрузки в шахте “Pedro de valdivia” для оптимизации машинного парка предприятия [170].

Буры А. (Alois BURÝ) и Чех Р. (René ČECH) разработали имитационную модель для исследования логистики шахты с помощью сетевых графиков [171].

Буры А. (Alois BURÝ) приводит применение имитационного моделирования для оптимизации угольного потока [172].

Кенжин Б.М. и Смирнов Ю.М. исследовали взаимодействие вибростенда с углеродным массивом [173].

Бертон А. (Berton A.) с соавторами выполнили моделирование процессов разгрузки в хранилище руды для планирования развития предприятия [174].

Чупин Ли (Cuiping Li) и соавторы создали пространственно-временную динамическую модель процессов распространения водопритока во время процессов добычи полезных ископаемых [175].

Махди S. (Mahdi S.) и Чарли С.Ли. (Charlie C.Li) реализовали численное моделирование лавы для оценки стабильности кровли [176].

Марцело Моретти Фиорони (Marcelo Moretti Fioroni) с соавторами выполнили моделирование логистики шахты с использованием имитационного моделирования [177].

Работа Ориола Фаливена (Oriol Falivene) с соавторами посвящена прогнозированию запасов угля в неоднородных зонах с использованием трехмерных моделей [178].

В публикациях за последние три года рассматриваются вопросы: влияния функционирования режимов работы забоя на вентиляцию [179], моделирования беспроводной сенсорной сети противопожарной защиты [180], моделирования вентиляции шахты для контроля возгорания остаточного угля в отработанном пространстве пласта [181], оптимизации расположения горизонтальных стволов скважин лавы [182]; анализа рисков проекта карьера основанном на применении оценочной модели О'Нага и генетических алгоритмов [183]; разработки лав заброшенных малых шахт [184]; анализа процесса разрушения горных пород на основе микросейсмического мониторинга и численного моделирования [185] и др.

### **Ближнее зарубежье**

Ученые ближнего зарубежья занимающиеся вопросами имитационного моделирования технологических процессов горнодобывающих предприятий в основном из Украины, что обусловлено наличием Донбасса. Работы украинских исследователей связаны с имитацией подсистем водоотлива, обеспечения безопасности, электроснабжения и транспортировки грузопотоков, а также процессами развития предприятия и выбора технологического оборудования.

В работе Шевченко В.Г. рассматривается разработка среды имитационного моделирования технологических процессов шахты, применяя метод статистических экспериментов с анимацией процесса имитации [186].

Мещанинов С.К. занимается разработкой среды имитационного моделирования промышленной безопасности шахт [187].

Работа Рухлова А.В. посвящена моделированию электрической нагрузки водоотливной установки во время действия аварийной брони электроснабжения угольной шахты [188]. Так же им выполнено исследование по выбору критерия оптимизации конвейерного транспорта с точки зрения энергосбережения [189], разработана имитационная модель транспортной системы шахты для выбора мест расположения бункеров [190].

Ткачев В.В. и Проценко С.Н. в своей работе рассматривают варианты расстановки бункеров в конвейерной линии с целью стабилизации грузопотока [191,192].

Вопросам моделирования процесса воздухораспределения в угольной шахте выполненного с помощью программы MineModeler посвящена работа Бондаренко В.И. и соавторов [193].

Моделирование влияния длины шпуров при буровзрывном способе проходки на протекания газодинамических процессов в забое рассматривается в работе В.В. Круковской и соавторов [194].

В статье Шабаяева О.Е. и др. рассматривается построение интеллектуализации процессов горных выемочных машин [195]. В процессе выполнения работы ими разработан интеллект выемочной машины, позволяющий осуществлять оптимизацию основных параметров (прогнозирование остаточного ресурса и др.).

Головнева Е.Е. в своей публикации приводит постановку задачи исследования экологических рисков массового закрытия горнодобывающих предприятий [196].

Губка Ю.А. и Оголубченко А.С. исследуют способ управления автоматизированным ступенчатым водоотливом с учетом периодов максимальных нагрузок в системе электроснабжения шахты [197].

Казимир В.В. и Серая А.А. разрабатывают модели верификации планов ликвидации аварий на угольных шахтах [198].

Разумный Ю.Т., Заика В.Т. и Прокуда В.Н. моделируют поток угля конвейерного транспорта [199].

Садовенко И. А. с соавторами решили задачу моделирования процесса затопления шахты с учетом дальнейшего использования ее теплового ресурса [200].

## Россия

Работы Российских ученых в основном связаны с исследованием рудопотоков, организацией работы забоев и общесистемными исследованиями.

Конюх В.Л. является одним из известных исследователей в области имитационного моделирования транспортных грузопотоков угля и роботизированных шахт. Его работы основаны на применении сетей Петри и построения систем массового обслуживания для дискретного представления состояний технологических объектов. Имитационное моделирование выполнялось, с помощью, созданной под руководством Владимира Леонидовича, среды NetStar [201]. В 2011 году выпущена книга «Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ» [202].

Учениками Конюха В.Л. являются Зиновьев В.В. и Гречишкин П.В. выполнившие работы в области имитационного исследования функционирования транспортных грузопотоков горнодобывающих предприятий. Зиновьев В.В. – занимается моделированием производственных систем в горном деле, машиностроении, теплофизике и энергосберегающих технологиях [203]. Гречишкин П.В. исследовал вопросы выбора технологических схем очистных работ и исследование сетей подземного транспорта [204].

Работы Тайлокова О.В. посвящены исследованию проблем контроля газовой атмосферы и прогнозирования выделения метана в процессе проведения выработок и добычи полезных ископаемых [205]. Также он занимался предпроектным анализом шахтных робототехнических систем [206].

В своей диссертации «Обоснование параметров короткозабойных технологий отработки околоствольных целиков с закладкой выработанных пространств» Голодов М.А. применяет имитационное моделирование для имитации организационно-технологических показателей [207].

В области исследования вопросов общесистемного характера выполнены работы:

- общесистемное представление угольной шахты [208];

- решение задачи формирования стратегии устойчивого развития угольных шахт [209];
- планирование горно-выемочных работ [210];
- изучение развития угольной промышленности, в рамках ТЭК [211].

Вопросам изучения рудопотоков и организации работы забоев посвящены следующие работы:

- анализ горных выработок на основе имитационного моделирования [212];
- использование имитационного моделирования для оптимизации проведения горных работ [213,214];
- имитация работы забойного комплекса на основе объектно-ориентированных технологий [192];
- имитационное моделирование грузового потока в калийных рудниках [215,216];
- исследование функционирования погрузочного транспорта горнодобывающих предприятий [217];
- организация рудопотока и управления затратами горнорудного предприятия [218];
- оценка вариантов отработки выемочного блока короткими забоями [219];
- повышение эффективности работы выемочных участков угольных шахт [220];
- прогнозирование буримости горных пород [221];
- моделирование работы очистного забоя угольной шахты, с использованием моделей шагающих крепей, очистных комбайнов и угольного пласта [222];
- изучение особенностей функционирования выемочных участков угольных шахт высокой производительности [223].

Белопушкин В.И. и Подольская Ю.А. рассматривают основы моделирования карьерного железнодорожного транспорта [224].

Стадником Д.А. исследована методика технологического картографирования на основе метода имитационного моделирования [225].

Бойко Е.А. в своей докторской диссертации, посвященной исследованию рекреационной способности энергетических углей, применил имитационное моделирование для разработки имитационных тренажеров энергетических котельных агрегатов [226].

Копылов К.Н., Решетняк С.Н. и Кубрин С.С. в своей публикации описывают реализацию имитационного моделирования системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты [227].

Лапшин А.А. приводит результаты моделирования кондиционирования рудничного воздуха в зоне горных работ [228].

Существуют работы, относящихся к моделированию геофизических, экономических процессов, стратегий развития и др., выполненных с применением метода имитационного моделирования [209,229].

Большое количество работ в областях вентиляции и геофизики выполнено с помощью аналитических методов.

### **Требования к МТО**

На основе проведенного обзора работ, посвященных имитационному моделированию технологических процессов шахт и рудников (работы Конюха В.Л., Зиновьева В.В., Гречишкина П.В., Лебедева А., Тайлакова О.В., Антипова И.В., Корнеева С.В., Шевченко В.Г., Panagiotou G.N., Sturgul, J.R., Vagenas N. и др.), и задач диссертационной работы сформулированы требования к МТО.

МТО должны обеспечивать: формирование аналоговых сигналов датчиков в объеме используемом АСУ ТП конвейерного транспорта и системы водоотлива (скорость движения ленты, потребление электроэнергии и др.); формирование дискретных сигналов (контроль схода ленты, кабель-тросовый выключатель и др.); формирование управляющих сигналов контроллерного уровня АСУ ТП; диспетчерских команд управления АСУ ТП; обеспечение точности моделирования,

достаточной для однозначной идентификации состояния ТО программно-аппаратным обеспечением соответствующей АСУ ТП.

### **1.5. Выводы по Главе 1**

В результате изучения и анализа предметной области сделаны следующие выводы, которые были учтены при выполнении диссертационной работы:

- наиболее перспективным подходом к разработке и тестированию прикладного программного обеспечения АСУ ТП является модельно-ориентированное проектирование (МОП). Подход МОП получил широкое распространение, особенно в сфере автоматизации. Наиболее часто он применяется для узкоспециализированных задач, таких как, стендовые испытания, верификация программного обеспечения, проектирование алгоритмов и др.;
- для рассматриваемой предметной области не существует специализированных комплексов тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП, осуществляющих генерацию сигналов датчиков только на основе математических моделей технологических процессов;
- в рамках решения задачи тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности для моделирования технологических процессов наиболее оптимальным является дискретно-событийный подход имитационного моделирования;
- существующие математические модели технологических процессов и оборудования предприятий горнодобывающей промышленности не обеспечивают генерацию сигналов датчиков ТО, управляющих воздействий и команд управления АСУ ТП в требуемом объеме.



## Глава 2. Имитационные модели технологического оборудования систем угольной шахты

Горнодобывающая промышленность сформировалась в 5 веке до н.э. В то время работы выполнялись небольшим количеством шахтеров (около 10 человек) и глубина выработок была не ниже уровня грунтовых вод. Современные шахты, рудники и карьеры отличаются значительными масштабами, количеством задействованной техники и автоматизацией производства. Горнодобывающие предприятия являются сложными техническими сооружениями с автоматизацией технологических процессов добычи полезных ископаемых.

К объектам горнодобывающей промышленности относятся [230]:

- карьер – «совокупность выработок на поверхности, образованная в результате ведения горных работ по добыче полезного ископаемого открытым способом. Применительно к предприятиям, добывающим уголь или россыпные полезные ископаемые, применяется термин разрез».
- шахта – «производственная единица горного предприятия, ведущего подземную добычу полезного ископаемого. Шахта включает наземные сооружения (копры, надшахтные здания, склады, административно-бытовые комбинаты и др.) и подземные горные выработки. Глубина выработок колеблется в пределах – от сотен метров до нескольких километров».
- рудник – «горнодобывающее предприятие с открытым или подземным способом разработки месторождения полезных ископаемых. Может включать несколько смежных цехов по добыче и переработке сырья, объединенных общим комплексом сооружений на поверхности. По структуре рудник схож с шахтой».
- и др.

В рамках диссертации рассматриваются технологические процессы и оборудование угольных шахт. Результаты диссертации могут быть также применены для других типов горнодобывающих предприятий.

## **2.1. Угольная шахта**

Угольная шахта является опасным промышленным объектом [23,231] и, в то же время, большой сложной системой характеризующейся динамикой процессов, неопределенностью входных параметров, вероятностными законами распределения случайных величин.

В структуре угольной шахты можно выделить системы: вскрытия, разработки, водоотлива, конвейерного транспорта, очистного забоя и др.[232,233]

Основными технологическими процессами угольной шахты являются: проведение выработок, вскрытие месторождений, подготовка к очистной выработке, проветривание горных выработок, осушение шахтных полей, очистная выемка полезных ископаемых, погрузка и транспортировка породы, и др.

### **2.1.1. Система конвейерного транспорта**

Система подземного транспорта угольной шахты предназначена для транспортировки добываемых полезных ископаемых на дневную поверхность, персонала и оборудования. Различают следующие виды подземного транспорта: канатно-кресельные дороги, конвейерный транспорт, подъемные установки, электровозный транспорт и монорельсовые дороги. В рамках диссертационной работы рассматривается система конвейерного транспорта.

Система конвейерного транспорта – основная система подземного транспорта угольной шахты, которая может состоять из нескольких конвейерных цепочек. В рамках диссертации рассматривается ТО конвейерных цепочек - ленточные конвейеры и бункеры.

### **2.1.2. Технологическое оборудование системы конвейерного транспорта**

#### **Ленточный конвейер**

Конвейеры предназначены для автоматической транспортировки породы на расстояния от десятков метров до нескольких километров, как в горизонтальной, так и наклонной плоскости. Они нашли широкое применение в угольных шахтах [234].

В угольных шахтах существуют конвейеры следующих типов: ленточные (для перемещения лентой на большие расстояния, порядка 10 км) и скребковые (грузы перемещаются скребками на малые расстояния, порядка 100 м) для перемещения сыпучих, кусковых и штучных грузов.

Конвейеры обладают возможностью разборки и увеличения длины посредством наращивания количества секций каркаса и монтирования дополнительных кусков транспортной ленты. Так же еще различают перегружатели – ленточные или скребковые конвейеры, имеющие подвижную основу каркаса, передвигающуюся по радиальным рельсам.

Основными составляющими частями конвейеров являются: барабан, лента (скребки, собранные цепями в единую конструкцию), каркас, ролики, приводная станция, узел натяжения ленты. Существуют различные виды сборки конвейеров, на рисунке 3 приведен один из вариантов. Структура агрегатов ТО конвейер представлена на рисунке.

Приводная станция, является составным элементом, в состав которой входят: цепи управления, пускатель, электродвигатель, тормозные колодки, гидромуфта и редуктор (рисунок 4).

Конвейер снабжен датчиками, контролирующими параметры его функционирования. Они обеспечивают измерение скорости движения ленты, скорости движения барабанов, температуру двигателей, контролируют положение ленты (контроль схода ленты), ограждение, освещение, питающую электросеть, аварийного отключения (кабель-тросовый выключатель) и др.

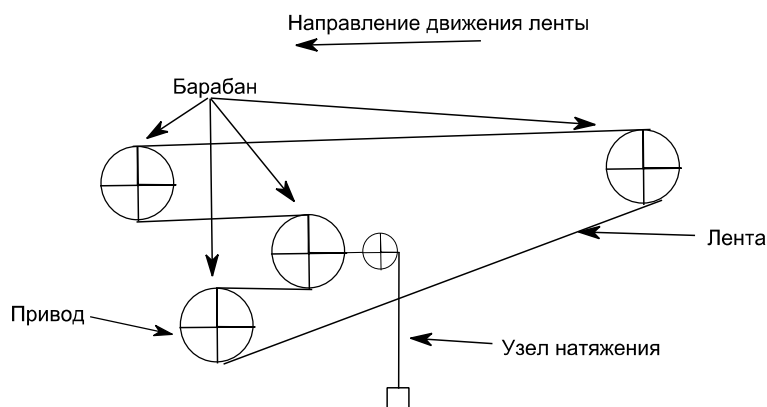


Рисунок 3. Структура ленточного конвейера

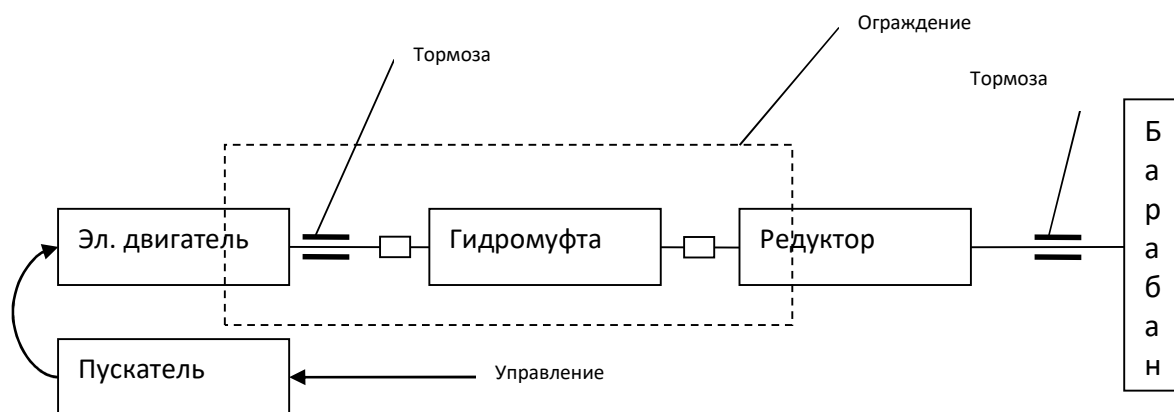


Рисунок 4. Структура приводной станции конвейера

## Бункер

Бункер представляет собой емкость для временного хранения излишков полезных ископаемых и предназначен для выравнивания грузовых потоков между конвейерами или конвейером и складом. В области размещения бункера размещается датчик заштыбовки, контролирующей переполнение бункера. Данный датчик как правило относится к конвейеру, который подает добываемые полезные ископаемые. Основные параметры бункера – максимально допустимый объем и скорость перегруза полезного ископаемого на впереди стоящий конвейер.

### 2.1.3. Система водоотлива

«Водоотливом называется комплекс мер по удалению воды, поступающей в горные выработки из водоносных пород, на поверхность» [233].

Система водоотлива [235] входит в состав систем безопасности угольной шахты и предназначена для предотвращения затопления горных выработок грунтовыми водами и отвода технологической воды. В рамках диссертации рассматриваются многоступенчатые системы водоотлива, состоящие из трубопроводов, насосов и приемных колодцев.

### 2.1.4. Технологическое оборудование системы водоотлива

#### Приемные колодцы (водосборники)

Вода, посредством сети канавок, самотеком собирается в подготовленные резервуары для дальнейшей перекачки на дневную поверхность или приемные колодцы на других горизонтах шахты. Водоотливные канавки устраивают в горизонтальных и наклонных выработках.

## **Трубопроводы**

Трубопроводная арматура обеспечивает коммутацию гидролинии между исходным приемным колодцем, насосами и принимающим приемным колодцем или резервуаром на дневной поверхности.

Нагнетательный трубопровод оборудуется задвижкой, обратным клапаном и компенсатором. Всасывающий трубопровод оборудуется сеткой и приемным клапаном. Клапаны трубопроводов могут иметь ручной или электропривод.

Приемный клапан удерживает воду в насосе перед пуском. Обратный клапан открывается давлением насоса и держит давление столба воды в трубопроводе при отключенном насосе. Задвижка предназначена для регулирования работы насоса. Для заполнения насоса водой перед пуском применяют контрольный кран, подающий воду из трубы следующей после насоса.

## **Насос**

Насосы и углесосы применяются в составе системы водоотлива, которая предотвращает подтопление или затопление выработок шахты. Мощность насосов выбирается исходя из водообильности горных выработок.

Для откачки воды из выработок применяют соответствующие схемы систем водоотлива. Реализующие забор воды насосом из приемного колодца и перекачку его на дневную поверхность или приемный колодец другого горизонта шахты. Насос состоит из рабочего органа, электродвигателя, средств автоматизации и контроля процесса водоотлива.

### **2.1.5. Технологическое оборудование вспомогательных систем**

#### **Трансформатор**

Трансформаторы предназначены для электропитания электросетей низкого напряжения или мощного низковольтного электрооборудования (электродрели и т.п.). На предприятиях горнодобывающей промышленности для повышения безопасности применяют трансформаторы сухого типа.

## **2.2. Управление технологическими процессами угольной шахты**

Для автоматизации систем добычи и транспортировки полезных ископаемых применяют АСУ ТП [236]. Структура которых состоит из трех уровней: датчиков, контроллеров, диспетчерского.

Контроллеры обеспечивают обработку информации, собираемой датчиками технологического оборудования, выработку управляющих воздействий на исполнительные механизмы и информационную связь с диспетчерским уровнем АСУ ТП. Диспетчерский уровень предназначен для контроля всей системой и телеуправления.

### **2.2.1. Автоматизированная система контроля и управления технологическим оборудованием угольных шахт**

В Институте вычислительных технологий СО РАН (ИВТ СО РАН) разрабатываются автоматизированные системы управления технологическими процессами для шахт, рудников, объектов нефтегазовой отрасли и др. [237].

Функционально, системы автоматизации, создаваемые в институте [237] для объектов горнодобывающей отрасли, можно разделить на две части – подземную (нижний уровень), обеспечивающую контроль, управление и сбор информации от различных технологических объектов шахты, и наземную (верхний уровень), выполняющую функции центрального вычислительного комплекса и рабочего места диспетчера.

В ИВТ СО РАН разработаны и внедрены в эксплуатацию такие системы как АСКУ ТО (Автоматизированная система контроля и управления технологическим оборудованием), АСКУ ТО 2 (Автоматизированная система контроля и управления технологическим оборудованием), АСКУ ТО М (Автоматизированная система контроля и управления технологическим объектом во взрывозащищенном исполнении) и др.

В рамках диссертационного исследования имитационный программно-аппаратный комплекс бы использован при создании АСКУ ТО М.

### 2.2.2. Описание АСКУ ТО М

Ввиду большой протяжённости и разветвлённости объектов контроля и управления нижний уровень реализован по принципам распределённой системы автоматики и открытой модульной структуры и представляет собой набор специализированных микропроцессорных устройств для сбора данных и управления исполнительными механизмами, размещаемыми вдоль конвейеров и другого ТО.

Система обеспечивает управление конвейерным транспортом, канатно-кресельной дорогой, шахтной стволовой сигнализацией, электроснабжением, шахтным водоотливом, системой позиционирования и оповещения персонала, вентиляторами главного проветривания и другими системами шахтной и промышленной автоматики.

Функции, выполняемые системой:

- сбор информации от датчиков объекта автоматизации;
- формирование команд управления исполнительными механизмами;
- организация процесса передачи команд верхнего уровня и передачи информации о состоянии от объектов автоматизации на верхний уровень;
- диагностика оборудования системы, проводных линий системы передачи данных и питания, а также других неисправностей аппаратуры, связанных с безопасностью работы оборудования и системы управления подъемной установкой;
- хранение сообщений, информации о параметрах и состоянии оборудования;
- отображение текущих и архивных данных в удобной для восприятия форме.

Для приема/передачи команд и информации функциональные устройства подключены к общему каналу связи RS-485. Номенклатура и количество функциональных устройств, входящих в Систему, определяются в зависимости от технических характеристик автоматизируемого объекта.

Порядок подключения функциональных устройств системы - произвольный и зависит от их функций и расположения оборудования объекта автоматизации.

Состав и количество функциональных устройств зависят от конкретного объекта контроля и управления горной выработки, позволяет избежать многих недостатков, присущих системам, построенным на основе релейных или электронных схем с жёсткой логикой, имеющих, в частности, ограничения по количеству подключаемых конвейеров, датчиков и расстоянию обслуживания, невозможности модифицировать состав оборудования и т.п. Такой способ организации системы позволяет применять её для автоматизации практически всего оборудования шахты, включая подземные распределительные устройства, вентиляционное оборудование, устройства контроля загазованности.

Центральным звеном подземной части оборудования является контроллер, предназначенный для контроля и управления технологическим оборудованием, с возможностью приема и передачи информации на диспетчера или другому контроллеру. Контроллер содержит в своем составе интеллектуальные модули ввода и вывода.

Рабочая станция диспетчера представляет собой персональный компьютер, работающий под управлением сетевой многозадачной операционной системы реального времени QNX 4.25 [238,239] и реализующий функции интерфейса оператора и сервера базы данных. На рисунке 5 приведен пример мнемосхемы системы конвейерного транспорта.

### **2.2.3. Аппаратное обеспечение АСКУ ТО М**

В состав аппаратного обеспечения АСКУ ТО М входят [240]:

- модули ввода и вывода, обеспечивающие функции сбора данных и формирования управляющих воздействий;
- блоки модулей ввода и вывода, которые состоят из набора модулей ввода и вывода;
- блоки контроллеров для управления конвейерами (БКУ), реализуют функции управления, сбора сигналов датчиков, формирования управляющих воздействий и связи с верхним уровнем;



– блоки контроллеров для управления насосами (БУН), функции аналогичны БКУ.

### Основные характеристики БКУ

Блок контроля и управления [241] предназначен для сбора информации о параметрах и состоянии оборудования технологических объектов, обработки и анализа полученных данных, управления работой отдельных объектов, входящих в состав системы, отображения информации на экране ЖК-дисплея и обмена информацией между однотипными блоками и с автоматизированным рабочим местом АРМ через интерфейс RS-485 и шину CAN. Кроме того, БКУ имеет средства для формирования команд с помощью функциональных кнопок на передней панели и получения подтверждений об их исполнении с помощью световой сигнализации. Общие характеристики БКУ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Общие характеристики БКУ

Наименование параметра	Характеристика
Режим работы	Круглосуточный
Напряжение питания от искробезопасного источника питания в пределах, В	10 – 14,2
Ток, потребляемый БКУ, мА. не более	600
БКУ обеспечивает прием сигнала типа «сухой контакт» с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «ia», количество входов, параметры входных сигналов: - уровень логической единицы, В, - уровень логического нуля, не более	20 3,3 0,2
БКУ имеет выходы управления исполнительными механизмами (выходной сигнал типа «сухой контакт» с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «ia») с параметрами:	
- количество выходных сигналов - максимальное напряжение постоянного или переменного тока на выходных контактах управления, В, не более - максимальный ток через выходные контакты, А, не более	12 60 2,0

Продолжение таблицы 1

Наименование параметра	Характеристика
БКУ обеспечивают (с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «ia») измерение аналоговых сигналов в диапазонах Количество входов измерение частотных сигналов в диапазонах Количество входов	от 4 до 20 мА от 0 до 20 мА 1 От 0 до 1000 Гц 4
В состав БКУ входит цветной TFT дисплей для визуализации алфавитно-цифровой и графической информации, светодиодные индикаторы и набор кнопок управления. Количество светодиодов Максимальное количество кнопок	5 16
БКУ имеет два независимых канала связи RS-485, протокол обмена	Modbus RTU
БКУ имеет интерфейс CAN, который используется в качестве внутренней полевой шины для модулей ввода-вывода	
БКУ имеет выход сети MicroLAN для связи с датчиками с интерфейсом 1-Wire	
Количество кабельных вводов, шт.	12
Габаритные размеры, мм	400 × 400 × 200
Масса БКУ, кг, не более	14

#### 2.2.4. Прикладное программное обеспечение АСКУ ТО М

Прикладное программное обеспечение контроллера состоит из блоков выполняющих следующие основные функции:

- контроля состояния датчиков;
- формирования управляющих воздействий в соответствии с текущим состоянием ТО;
- взаимодействия с диспетчерским уровнем и другими контроллерами;
- конфигурация параметров функционирования контроллера;
- выбор режима функционирования контроллера (местный, дистанционный и ремонтный).

Алгоритм управления БКУ представляет собой автомат, описывающий правила формирования управляющих воздействий в зависимости от состояния сигналов датчиков и команд управления (локальных с пульта или диспетчерских).

### 2.2.5. Основные датчики систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты

В Таблицах 2 и 3 приведены перечни типовых наборов датчиков для контроля состояния ленточного конвейера и насоса водоотливной установки.

Таблица 2. Типовой перечень датчиков ленточного конвейера

№ п/п.	Название сигнала датчика	Тип датчика	Тип сигнала	Кол-во	Об.
1	Контроль датчиков аварийной остановки	Кабель-тросовый выключатель (КТВ)	Дискретный	1	X <sub>1</sub>
2	Контроль датчиков схода ленты	Датчик схода ленты (КСЛ)	Дискретный	1	X <sub>2</sub>
3	Контроль датчика заштыбовки	Датчик заштыбовки	Дискретный	1	X <sub>3</sub>
4	Контроль скорости ленточного полотна	Датчик скорости ленты (ДКС)	Аналоговый	1	X <sub>4</sub>
5	Контроль скорости приводных барабанов	ДКС приводного барабана	Аналоговый	1	X <sub>5</sub>
6	Контроль пробуксовки ленточного полотна		Расчетный	1	X <sub>6</sub>
7	Контроль ограждений	Датчик контроля ограждений	Дискретный	1	X <sub>7</sub>
8	Контроль натяжения ленты	Датчик контроля натяжения ленты	Дискретный	1	X <sub>8</sub>
9	Контроль давления в пожарном трубопроводе	Датчик давления пороговый	Дискретный	1	X <sub>9</sub>
10	Контроль состояния электродвигателя вкл./выкл.	Реле положения коммутационного аппарата	Дискретный	1	X <sub>10</sub>
11	Контроль состояния тормозов приводного барабана вкл./выкл.	Датчики положения тормозов	Дискретный	1	X <sub>11</sub>
12	Включение/выключение предупредительной сигнализации	Реле источника питания	Дискретный	1	X <sub>12</sub>
13	Контроль устройства автоматического пожаротушения (УАП)	Реле УАП	Дискретный	1	X <sub>13</sub>
14	Контроль от предыдущего конвейера		Дискретный		X <sub>14</sub>

Таблица 3. Типовой перечень датчиков водоотливной установки

№ п/п.	Назначение сигнала	Тип датчика	Тип сигнала	Кол-во
1	Задвижка на напоре открыта	Реле открытия задвижки	Дискретный	1
2	Задвижка на напоре закрыта	Реле закрытия задвижки	Дискретный	1
3	Контроль включения двигателя	Реле двигателя	Дискретный	1
4	Уровень воды в баке	Датчик уровня	Дискретный	1
5	Давление на напоре	Датчик давления	Аналоговый	1
6	Давление в коллекторе	Датчик давления	Аналоговый	1
7	Температура подшипника двигателя	Датчик температуры	Аналоговый	1
8	Температура обмотки двигателя	Датчик температуры	Аналоговый	1
9	Температура подшипника насоса	Датчик температуры	Аналоговый	1
10	Вибрация подшипника электродвигателя	Датчик вибрации	Аналоговый	1
11	Вибрация подшипника насоса	Датчик вибрации	Аналоговый	1

### 2.2.6. Основные управляющие сигналы АСКУ ТО М систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты

В Таблицах 4 и 5 приведены перечни типовых наборов управляющих сигналов для систем конвейерного транспорта и водоотлива.

Таблица 4. Типовой перечень управляющих сигналов ленточного конвейера

№ п/п.	Назначение сигнала	Тип сигнала	Кол-во	Обозн.
1	Включение предпусковой сигнализации	Дискретный	1	Y <sub>1</sub>
2	Разрешение запуска для следующего конвейера	Дискретный	1	Y <sub>2</sub>
3	Запуск/останов двигателя	Дискретный	1	Y <sub>3</sub>
4	Наложение/снятие тормоза	Дискретный	1	Y <sub>4</sub>

Таблица 5. Типовой перечень управляющих сигналов водоотливной установки

№ п/п.	Назначение сигнала	Тип сигнала	Кол-во
1	Закрыть задвижку на напоре	Дискретный	1
2	Открыть задвижку на напоре	Дискретный	1
3	Выключение двигателя насоса	Дискретный	1
4	Включение двигателя насоса	Дискретный	1
5	Включение аварийной сигнализации	Дискретный	1
6	Включение сигнализации	Дискретный	1

### 2.2.7. Основные контролируемые временные параметры систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты

В таблицах 6 и 7 приведены контролируемые временные параметры ТО для систем конвейерного транспорта и водоотлива.

Таблица 6. Типовой перечень контролируемых временных параметров ТО «Конвейер»

№ п/п.	Назначение сигнала	Ед. изм.	Типовое значение	Обозн.
1	Время предупредительной звуковой сигнализации	сек.	Настраиваемый	T <sub>1</sub>
2	Время аварийной сигнализации	сек.	Настраиваемый	T <sub>2</sub>
3	Время разгона конвейера	сек.	Настраиваемый	T <sub>3</sub>
4	Время останова конвейера	сек.	Настраиваемый	T <sub>4</sub>
5	Время пробуксовки ленты	сек.	Настраиваемый	T <sub>5</sub>
6	Время ожидания сигналов управления/датчиков	сек.	Настраиваемый	T <sub>6</sub>

Таблица 7. Типовой перечень контролируемых временных параметров ТО «Насос»

№ п/п.	Назначение сигнала	Ед. изм.	Типовое значение
1	Время включения двигателей	сек.	Настраиваемый
2	Время выключения двигателей	сек.	Настраиваемый
3	Время открытия задвижек на напоре	сек.	Настраиваемый
4	Время закрытия задвижек на напоре	сек.	Настраиваемый
5	Время достижения номинального давления на напоре	сек.	Настраиваемый
6	Время подачи предупредительной сигнализации	сек.	Настраиваемый
7	Время аварийной сигнализации	сек.	Настраиваемый

### 2.2.8. Основные контролируемые временные параметры систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты

#### ТО Конвейер

Состояние  $S_0$  имеет неопределенные входные сигналы, состояние  $S_1$  задано входным набором сигналов и команд управления в виде формулы (6). Управляющие воздействия в состояниях  $S_0$  и  $S_1$  заданы в формулой (7). В таблице 8 приведен перечень состояний прикладного программного обеспечения контроллера АСКУ ТО М системы конвейерного транспорта.

$$\begin{aligned} & \neg X_1 \cap \neg X_2 \cap \neg X_3 \cap XA \cap \neg X_7 \cap \neg X_8 \cap \neg X_9 \cap \neg X_{10} \cap \neg X_{10} \cap X_{11} & (6) \\ & \cap \neg X_{12} \cap \neg X_{13} \cap (\neg X_{14} \cap \neg ST_3) \cap CC_1 \cap CC_2 \cap CC_3 \\ & \cap CC_4 \cap CC_5 \cap CC_6 \cap CC_7 \cap CC_8 \cap CD_1 \cap CD_2 \cap CD_3 \\ & \cap CD_4 \cap CD_5 \cap CD_6 \cap CD_7 \cap CD_8 \cap ((ST_1 \cup ST_2 \cup ST_3) \\ & \cap \neg ST_4) \end{aligned}$$

$$\neg Y_1 \neg Y_2 \neg Y_3 Y_4 \quad (7)$$

## ТО Насос

Состояние  $S_0$  имеет неопределенные входные сигналы, состояние  $S_1$  задано входным набором сигналов и команд управления. Управляющие воздействия находятся в исходном состоянии. В таблице 9 приведен перечень состояний прикладного программного обеспечения контроллера АСКУ ТО М системы водоотлива.

Таблица 8. Состояния прикладного программного обеспечения контроллера АСКУ ТО М системы конвейерного транспорта

№ п/п.	Название состояния	Обозначение
1	Сбор контроллера	$SS_1$
2	Конфигурация	$SS_2$
3	Инициализация	$S_0$
4	Остановлен (Готовность)	$S_1$
5	Ожидание автозапуска	$S_2$
6	Предпусковая сигнализация	$S_3$
7	Тормоз снят	$S_4$
8	Двигатель включен	$S_5$
9	Контроль скорости	$S_6$
10	Работа	$S_7$
11	Сигнализация	$S_8$
12	Двигатель выключен	$S_9$
13	Тормоз установлен	$S_{10}$
14	Ожидание остановки конвейера	$S_{11}$
15	Авария	$SA_1$
16	Звуковая сигнализация аварийного режима	$SA_2$
17	Ожидание сброса аварий	$SA_3$

Таблица 9. Состояния прикладного программного обеспечения контроллера АСКУ ТО М системы водоотлива

№ п/п.	Назначение сигнала	Обозначение
1	Сбор контроллера	SS <sub>1</sub>
2	Конфигурация	SS <sub>2</sub>
3	Инициализация	S <sub>0</sub>
4	Остановлен (Готовность)	S <sub>1</sub>
5	Предпусковая сигнализация	S <sub>3</sub>
6	Включение задвижки	S <sub>4</sub>
7	Контроль сигналов состояния во время открытия задвижки	S <sub>5</sub>
8	Открытие задвижки	S <sub>6</sub>
9	Выключение хода задвижки	S <sub>7</sub>
10	Задвижка открыта	S <sub>8</sub>
11	Работа (контроль давления на задвижке)	S <sub>9</sub>
12	Контроль сигналов состояния во время закрытия задвижки	S <sub>10</sub>
13	Закрытие задвижки	S <sub>11</sub>
14	Выключение хода задвижки	S <sub>12</sub>
15	Задвижка закрыта	S <sub>13</sub>
16	Отключение двигателя	S <sub>14</sub>
17	Авария	SA <sub>1</sub>
18	Звуковая сигнализация аварийного режима	SA <sub>2</sub>
19	Ожидание сброса аварий	SA <sub>3</sub>

### 2.2.9. Команды управления контроллерного и диспетчерского уровней АСКУ ТО М систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты

Режимы функционирования контроллеров АСКУ ТО М: местный (ST<sub>1</sub>), диспетчерский (ST<sub>2</sub>), ремонтный (ST<sub>3</sub>) и конфигурирования (ST<sub>4</sub>). Местный режим



допускает только команды управления контроллерного уровня. Ремонтный режим допускает подачу команд на контроллерном уровне (контроллер не реагирует на состояние не аварийных датчиков, связывающих данный ТО с другими объектами). Дистанционный режим обеспечивает диспетчерское управление. Переключение между режимами может быть дистанционным или локальным на контроллерном уровне, за исключением ремонтного режима, который возможно включить только непосредственно с пульта контроллера. При включенном дистанционном режиме нельзя с контроллерного уровня включить местный или ремонтный режимы. При конфигурировании контроллера блокируются все функции управления ТО и сбрасываются в исходные состояния выходы управляющих воздействий.

В таблицах 10 и 11 приведены команды управления диспетчерского и контроллерного уровней АСКУ ТО М систем конвейерного транспорта и водоотлива угольной шахты.

Таблица 10. Команды управления диспетчерского и контроллерного уровней АСКУ ТО М системы конвейерного транспорта угольной шахты

<b>№ п/п.</b>	<b>Название команды управления</b>	<b>Уровень исполнения команды</b>	<b>Об.</b>
1	Кнопка переключения режима «Местный»	Контроллерный	СС <sub>1</sub>
2	Кнопка переключения режима «Дистанционный»	Контроллерный	СС <sub>2</sub>
3	Кнопка переключения режима «Ремонтный»	Контроллерный	СС <sub>3</sub>
4	Пуск конвейера	Контроллерный	СС <sub>4</sub>
5	Остановка конвейера	Контроллерный	СС <sub>5</sub>
6	Сигнал	Контроллерный	СС <sub>6</sub>
7	Сброс аварий	Контроллерный	СС <sub>7</sub>
8	Экстренный останов. Кнопка «Авария»	Контроллерный	СС <sub>8</sub>
9	Конфигурация	Контроллерный	СС <sub>9</sub>
10	Запуск конвейера	Диспетчерский	CD <sub>1</sub>

Продолжение таблицы 10

<b>№ п/п.</b>	<b>Название команды управления</b>	<b>Уровень исполнения команды</b>	<b>Об.</b>
11	Останов конвейера	Диспетчерский	CD <sub>2</sub>
12	Включить предупредительную сигнализацию	Диспетчерский	CD <sub>3</sub>
13	Сброс аварий	Диспетчерский	CD <sub>4</sub>
14	Установить режим дистанционного управления	Диспетчерский	CD <sub>5</sub>
15	Установить режим ремонта	Диспетчерский	CD <sub>6</sub>
16	Установить/сбросить режим автозапуска	Диспетчерский	CD <sub>7</sub>
17	Перезапуск контроллера	Диспетчерский	CD <sub>8</sub>

Таблица 11. Команды управления диспетчерского и контроллерного уровней АСКУ ТО М системы водоотлива угольной шахты

<b>№ п/п.</b>	<b>Название команды управления</b>	<b>Уровень исполнения команды</b>
1	Кнопка переключения режима «Местный»	Контроллерный
2	Кнопка переключения режима «Дистанционный»	Контроллерный/ Диспетчерский
3	Кнопка переключения режима «Ремонтный»	Контроллерный
4	Пуск насоса	Контроллерный
5	Стоп насоса	Контроллерный
6	Открыть задвижку на напоре	Контроллерный
7	Закрыть задвижку на напоре	Контроллерный
8	Экстренный останов	Контроллерный
9	Включить автоматический режим	Диспетчерский
10	Выключить автоматический режим	Диспетчерский

## Продолжение таблицы 11

№ п/п.	Название команды управления	Уровень исполнения команды
11	Запуск двигателя	Диспетчерский
12	Останов двигателя	Диспетчерский
13	Открыть задвижку на напоре	Диспетчерский
14	Закрыть задвижку на напоре	Диспетчерский
15	Остановить задвижку на напоре	Диспетчерский
16	Включить предупредительную сигнализацию	Диспетчерский
17	Сброс аварий	Диспетчерский
18	Установить режим внешнего управления	Диспетчерский
19	Включить аварийную сигнализацию	Диспетчерский
20	Включить вызывную сигнализацию	Диспетчерский
21	Выключить аварийную или вызывную сигнализацию	Диспетчерский
22	Перезапуск контроллера	Диспетчерский

### 2.3. Модель технологического оборудования в MTSS

МТО представляет собой описание параметров, зависимостей, визуализации состояния и взаимодействия с другими разработанными моделями в терминах среды моделирования MTSS с помощью универсального языка Java [13].

Разработка МТО осуществляется с помощью среды Eclipse IDE на универсальном языке программирования Java специалистом по имитационному моделированию. Организация библиотек в MTSS обеспечивается представлением каждой библиотеки как отдельного Java проекта. Взаимодействие между библиотеками осуществляется введением классов интерфейсов.

Структура типовой МТО в MTSS состоит из следующих частей:

- графическая – условное графическое обозначение, поддерживающее анимацию;
- свойства объекта – определение возможных характеристик, входных и выходных параметров;
- имитационная модель – зависимость выходных параметров объекта от входных, список состояний объекта и условия прехода между ними;
- команды управления ТО;
- интерфейс связи с базой данных;
- дополнительных расширений и т.п.

В среде MTSS для создания МТО предусмотрен набор классов: `TemplateSubject`, `TemplateAnimation`, `TemplateDescription`, `TemplateDisposition`, `TemplateTask`, `TemplatePort`.

Наследуя класс `TemplateSubject` описывается функционирование МТО, внутренние параметры, статистические данные и др. К методам инициализации относятся следующие: `notifySystemStart` (действия выполняемые при запуске имитации в первую очередь), `initStatistics` (формирование параметров для визуализации статистики МТО). Другие методы класса выполняют следующие функции соответствующего ТО: моделирование параметров, реализация перехода между состояниями, обеспечение взаимосвязи с другими МТО посредством реализации соответствующих интерфейсов и другие пользовательские функции.

Наследуя класс `TemplateDescription` описываются внешние параметры МТО, способы коммуникации с другими моделями и обеспечивается связь между классами `TemplateSubject` и `TemplateAnimation`. С помощью переменной `nameModelDescription` задаются основные подписи и пути расположения графических материалов. Методы `NameTemplateDescriptor`, `assignPorts` и `defineStatusWorkers` определяют соответственно способ задания внешних параметров объекта, количество и тип портов, функции для обработки состояний МТО.

Графическое представление МТО описывается в классе, наследуемом от `TemplateAnimation`. Методы `redrawEscrAnimation` и `drawShape` выполняют графическую анимацию двухмерного изображения. Метод `get3Dshape` предназначен для создания трехмерного изображения. Среда MTSS использует в качестве источника трехмерных моделей файлы формата AC3D и стандартные объекты поддерживаемые Java3D.

Наследуя класс `TemplateDisposition` описывают команды ТО – в методе `createComposite` создаются кнопки и им назначаются обработчики событий, вызывающие соответствующие методы класса, наследуемого от `TemplateSubject`. Дополнительно можно реализовывать связь с базой данных.

Последовательность перехода между состояниями задается в классе, который наследуется от класса `TemplateTask`. Новые события для МТО запускаются следующим образом: после нажатия на командную кнопку происходит вызов метода в классе `НазваниеОбъектаSubject`, который регистрирует новое событие. Происходит проверка возможности его наступления и, если возможно, переход МТО в новое состояние. Если событие не является конечным, например, запуск конвейера, то по завершении разгона конвейер перейдет в новое состояние «работа» без подачи управляющей команды.

С помощью портов МТО могут взаимодействовать между собой. Тип порта описывается классом, который наследуется от класса `TemplatePort`. Методы `redrawPort` и `isInGlue` позволяют выполнить графическую визуализацию и проверку соединены ли порты между собой.

Процесс разработки МТО технологического объекта [132,242]:

- формулировка цели исследования;
- сбор информации и данных;
- разработка концептуальной модели;
- проверка концептуальной модели на адекватность поставленной задаче;
- перевод концептуальной модели с помощью программных средств в машинное представление;

- верификация запрограммированной модели;
- документирование МТО.

Перевод в машинное представление осуществляется в соответствии со структурой представления МТО в среде имитационного моделирования MTSS.

Верификация разработанной МТО выполняется путем сравнения ее функционирования с заданным в концептуальной модели поведением. Для этого в MTSS окне графического редактора создается мнемосхема имитационной модели системы, задаются начальные условия и выполняется ряд тестовых экспериментов.

Применение МТО в разработке мнемосхемы моделируемой системы представляет собой визуально интерактивный способ с настройкой параметров модели. На рисунке 5 приведена мнемосхема имитационной модели, собранная из нескольких МТО библиотеки системы конвейерного транспорта. В качестве вспомогательных МТО применены генератор, трансформатор, линия электропередачи.

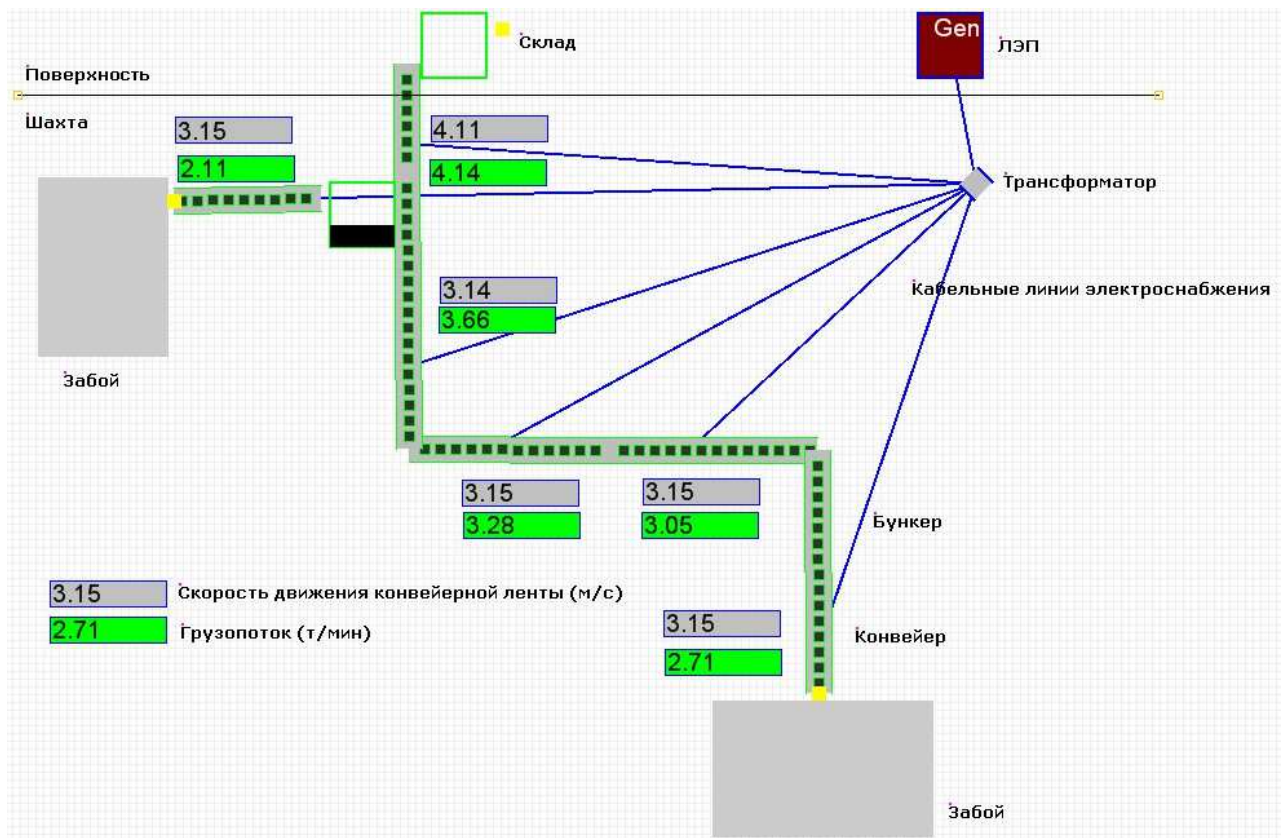


Рисунок 5. Пример мнемосхемы разработанной имитационной модели системы конвейерного транспорта

## 2.4. Расширенная модель технологического оборудования в MTSS

Для среды моделирования MTSS была разработана усовершенствованная структура МТО, которая представлена набором множеств (8), а на рисунке 6 представлена взаимосвязь между элементами МТО (пунктирные линии – информационные, сплошные линии – управление).

$$MTO = \{SUBM, KTO, KACS, PIC, PORT, PARAM, VAR, M, COM, SIG, MS, I, STAT\}, \quad (8)$$

где *SUBM* – набор имитационных моделей составных частей ТО (например, двигатель, редуктор и гидромурфта приводной станции конвейера и т.п.), детализирующий функционирование моделируемого объекта; *KTO* – алгоритм функционирования ТО, представляющий собой конечный автомат, описывающий состояния, в которых МТО может находиться в процессе имитации, *KACS* – конечный автомат алгоритма прикладного программного обеспечения АСУ ТП; *PIC* – условное графическое обозначение МТО; *PORT* – входные и выходные порты (каналы передачи данных, имеющие графическую часть на условном графическом обозначении модели), связывающие данную МТО с другими МТО, входящими в имитационную модель системы; *PARAM* – параметры моделируемого объекта; *VAR* – переменные состояния объекта; *M* – математическое описание зависимостей между переменными и параметрами моделируемого объекта; *COM* – список команд управления ТО, при выполнении которых МТО переходит из одного состояния в другое, и сигналов управления составными частями ТО (например, двигатель приводной станции конвейера); *SIG* – таблица сигналов датчиков и команд управления, содержащая набор данных, представленных в выражении (7); *MS* – имитационные модели аналоговых датчиков, выполняющие функцию преобразования модельных сигналов к сигналам датчиков; *I* – интерфейсная часть, обеспечивающая взаимодействие между МТО и интерфейсной частью комплекса, где выполняется формирование цифровых тестовых сигналов в соответствии с конфигурацией прикладного программного и аппаратного обеспечений АСУ ТП; *STAT* – интерфейс сбора статистики о функционировании МТО.

Состояние таблицы сигналов датчиков и команд управления задано набором множеств (9).

$$SIG_i = \{COMU_i, COMD_i, SD_i, SA_i\}, \quad (9)$$

где *SIG<sub>i</sub>* – состояние таблицы сигналов на *i*-ом шаге моделирования; *COMU<sub>i</sub>* – команды управления диспетчера на *i*-ом шаге моделирования; *COMD<sub>i</sub>* – сигналы управления составными

частями ТО на  $i$ -ом шаге моделирования;  $SD_i$  – состояние дискретных сигналов датчиков ТО на  $i$ -ом шаге моделирования;  $SA_i$  – состояние аналоговых сигналов датчиков ТО на  $i$ -ом шаге моделирования.

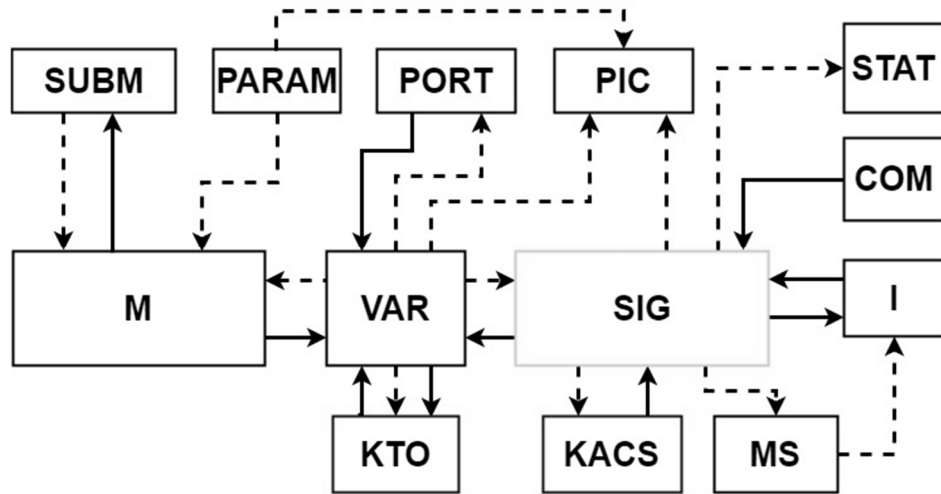


Рисунок 6. Взаимосвязь между элементами структуры МТО

Значения сигналов датчиков формируются по формуле (10) в процессе взаимодействия блоков конечных автоматов, описывающих алгоритмы функционирования ТО и прикладного программного обеспечения АСУ ТП, и математического описания взаимосвязей между параметрами и переменными. Алгоритм интерфейсной части МТО преобразует виртуальное значение переменной (например, скорость конвейерной ленты) из физической величины в кодовое значение, нормированное в диапазон значений датчика. Физические сигналы датчиков формируются алгоритмом интерфейсной части комплекса, обеспечивающими сопряжение между имитационной моделью и аппаратными системами. Нормированное значение поступает через интерфейсную часть комплекса на вход преобразующего устройства, которое конвертирует цифровой сигнал в физический, поступающий на вход тестируемой АСУ ТП вместо сигналов реальных датчиков.

Команды управления могут быть заданы в ручном или автоматизированном режиме. Интерфейсная часть комплекса формирует пакеты данных, в соответствии с применяемыми в АСУ ТП протоколами, для отправки команд управления в контроллерный уровень АСУ ТП.



$$f(\text{Port}_i, \text{Var}_i, \text{Param}, \text{Com}_i) \xrightarrow{M} \text{Sig}_i, \quad (10)$$

где  $f$  – функция генерации данных для таблицы сигналов,  $\text{Port}_i$  – входные данные на  $i$ -ом шаге моделирования;  $\text{Var}_i$  – значения внутренних переменных на  $i$ -ом шаге моделирования;  $\text{Param}$  – проектные параметры ТО;  $\text{Com}_i$  – команды управления диспетчера и сигналы управления составными частями ТО на  $i$ -ом шаге моделирования;  $\text{Sig}_i$  – состояния набора данных таблицы сигналов МТО на  $i$ -ом шаге моделирования.

Генерация таблицы сигналов  $\text{Sig}_i$ , в том числе сигналов  $\text{Err}_i$  нештатных и аварийных ситуаций, выполняется посредством организованной взаимосвязи между конечными автоматами ТО и прикладного программного обеспечения АСУ ТП в соответствии с формулой (9).

$$M: A_i \times S_{KTO_i} \times S_{KACS_i} \times SUBM_i \rightarrow \text{Sig}_i, \text{Err}_i, \quad (11)$$

где  $A_i$  – входной алфавит конечных автоматов  $KTO$  и  $KACS$  на  $i$ -ом шаге моделирования;  $S_{KTO_i}$  – текущее состояние конечного автомата  $KTO$  алгоритм функционирования ТО на  $i$ -ом шаге моделирования;  $S_{KACS_i}$  – состояние конечного автомата  $KACS$  алгоритма прикладного программного обеспечения АСУ ТП на  $i$ -ом шаге моделирования;  $SUBM_i$  – состояние набора имитационных моделей составных частей ТО на  $i$ -ом шаге моделирования;  $\text{Sig}_i$  – состояния набора данных таблицы сигналов МТО на  $i$ -ом шаге моделирования;  $\text{Err}_i$  – состояние набора сигналов нештатных или аварийных ситуаций на  $i$ -ом шаге моделирования.

МТО строится на основе базового шаблона имитационной модели объекта в среде имитационного моделирования MTSS путем настройки, расширения и добавления классов и методов в соответствии с логикой функционирования имитируемого объекта и предложенной усовершенствованной структурой МТО.

Шаблонные классы, предназначенные для создания МТО, обеспечивают структуру для описания:

- функционирования ТО, внутренних переменных, статистических данных и др.;
- графического представления;
- параметров, способов коммуникации с другими МТО, связь между функциональным описанием объекта и графическим представлением;
- команды управления.

Адекватность генерации данных таблицы сигналов обуславливается точностью формирования этого набора сигналов и его временных параметров. Точность формирования значений сигналов датчиков определяется погрешностью вычисления виртуальных сигналов, преобразованием значений виртуальных сигналов в код, преобразованием кода в реальный сигнал в соответствующем блоке формирования физических сигналов и влиянием схемы коммутации комплекса и контроллера АСУ ТП.

Например, при генерации тестового токового сигнала 0-20 мА относительная погрешность всех измерений не превысила погрешность преобразования физических сигналов реальной АСУ ТП и составила не более 2%.

Точность задания временных параметров сигналов важна с точки зрения выполняемых проверок прикладного программного обеспечения АСУ ТП, которые в рассматриваемой предметной области сводятся к контролю выхода значений сигналов за пороговые значения.

Валидация модели ТО выполняется с помощью проверки соответствия ее функционирования и принципов функционирования соответствующего оборудования.

Валидация модели прикладного программного обеспечения выполняется с помощью проверки соответствия функций управления, реализуемых моделью прикладного программного обеспечения, перечню требований к прикладному программному обеспечению АСУ ТП.

В рабочем окне MTSS каждая МТО представляет собой графический элемент с входными и выходными «портами», которые связаны с соответствующими входными и выходными параметрами. С помощью «портов» осуществляется взаимодействие МТО между собой.

В соответствии с описанной методикой разработана специализированная библиотека имитационных моделей технологического оборудования систем угольной шахты: конвейерного транспорта и водоотлива.

Созданные по описанной методике МТО, отличаются от моделей, созданных по первоначальной методике тем, что позволяют обеспечить формирование

сигналов датчиков, управляющих воздействий и команд управления, а так же реализуют имитацию функционирования прикладного программного обеспечения АСКУ ТО М.

В состав библиотеки входят следующие имитационные модели технологического оборудования: забой, бункер, конвейер, насос, водопровод, резервуар, источник технологических и грунтовых вод, трансформатор, кабель линии электропередач.

## **2.5. Имитационные модели технологического оборудования подсистемы подземного транспорта**

Процесс разработки модели технологического оборудования рассмотрим на примере МТО «Конвейер» системы конвейерного транспорта угольной шахты [4,12,13].

### **2.5.1. Конвейер**

Логика функционирования МТО «Конвейер» основана на закономерностях функционирования соответствующего оборудования и алгоритмах прикладного программного обеспечения АСУ ТП.

Для выполнения цели тестирования прикладного программного обеспечения необходимо обеспечить генерацию сигналов датчиков ТО Конвейер и управляющих сигналов АСУ ТП. МТО имеет следующие параметры: аналоговые (скорость движения ленты, загрузка конвейерной ленты, температура двигателей и др.) и дискретные сигналы (контроль схода ленты, состояние кабель-тросовых выключателей, сигнал «заштыбовки» и др.). Моделируемые сигналы соответствуют набору входных и выходных сигналов датчиков реального конвейера, которыми оперирует управляющий контроллер АСУ ТП. В таблице 12 приведены группы имитируемых параметров МТО «Конвейер».

МТО обеспечивает имитацию сигналов датчиков ТО «Конвейер» на основе алгоритма функционирования, формализованное представление которого в виде конечного автомата изображено на рисунке 7, и параметров, заданных при разработке имитационной модели системы.

Таблица 12. Параметры МТО «Конвейер»

Наименование параметра	Тип данных
Состояние конвейера	Код состояния
Команды верхнего уровня	Коды команд
Состояние аналоговых датчиков	Массив значений
Состояние дискретных датчиков	Массив значений
Управляющие воздействия	Массив значений
Геометрические параметры конвейера	Длина конвейера, ширина ленты
Параметры приводной станции	Количество двигателей

Конечный автомат, описывающий переходы между состояниями ТО конвейер (12).

$$K = \{S, A, S_0, g, F\}, \quad (12)$$

где  $S = \{S_1, \dots, S_5\}$  – состояния модели технологического оборудования «конвейер» и алгоритма управления АСУ ТП,  $S_0$  – начальное состояние, формирующееся при запуске имитации,  $A = \{a_1, \dots, a_6\}$  – входной алфавит автомата;  $g$  – функция переходов;  $F = \{S_0\}$  – конечное состояние.

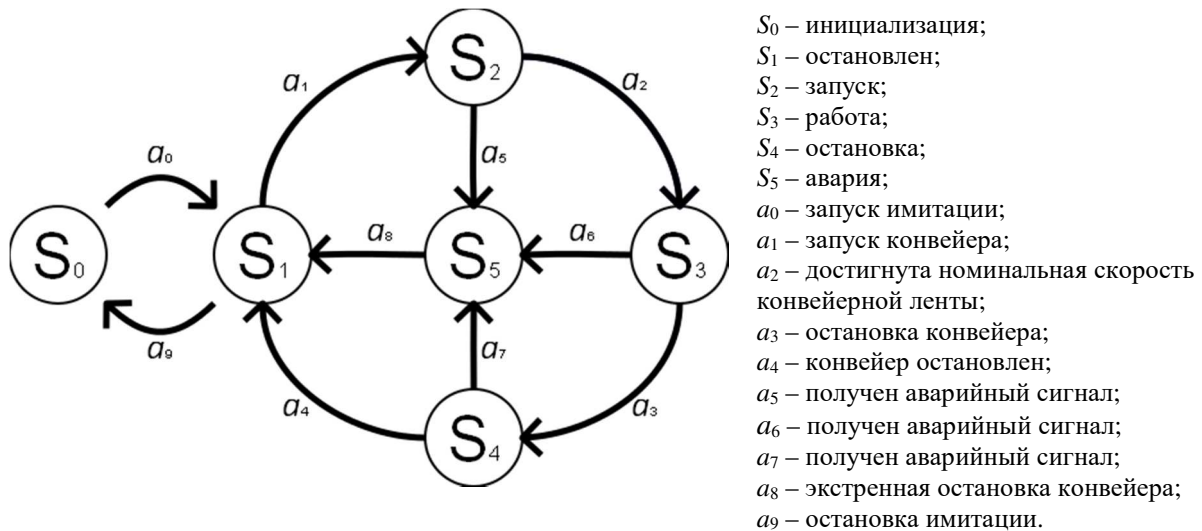


Рисунок 7. Конечный автомат МТО «конвейер»

Для каждого состояния характерны соответствующие изменения сигналов датчиков ТО, которые вычисляются на основании текущих значений внутренних переменных состояния МТО и таблицы сигналов. К таким переменным и сигналам относятся: скорость конвейерной ленты, транспортный грузопоток, флаг наличия электропитания, степень пробуксовки конвейерной ленты, состояние сигналов

экстренных датчиков (задаваемые по сценарию или в ручном режиме) и управляющих воздействий АСУ ТП, команды контроллерного и диспетчерского уровней.

В демонстрационных целях реализована имитация грузопотока, который представлен в виде дискретных объемов (13) [243]:

$$L = \sum_{i=1}^k l_i = \sum_{i=1}^k f(l_i) * \Delta t, k = \frac{T}{\Delta t}, t_i = i * \Delta t, \quad (13)$$

где  $\Delta t$  – шаг квантования грузопотока по времени,  $k$ - число дискретных объемов за время  $T$ ,  $f(t_i)$  - объем полезного ископаемого за  $t_i$ .

Модель прикладного программного обеспечения представляет собой конечный автомат, состояния которого описывают функционирование АСУ ТП при соответствующих входных воздействиях. Переходы между состояниями осуществляются при изменении состояния сигналов датчиков с одновременным формированием соответствующих выходных сигналов управления.

Команды управления представлены командами АСУ ТП (пуск, остановка, сигнал, аварийная остановка, переключение режимов функционирования) без разделения на локальный и диспетчерский уровни.

Разработку модели прикладного программного обеспечения АСКУ ТО М удобно выполнять с помощью подхода автоматного программирования [244]. Автоматизированное управление состоянием МТО осуществляется подачей команд управления. На рисунках 8-13 приведена структура и алгоритмы прикладного программного обеспечения.



Рисунок 8. Структура прикладного программного обеспечения АСУ ТП

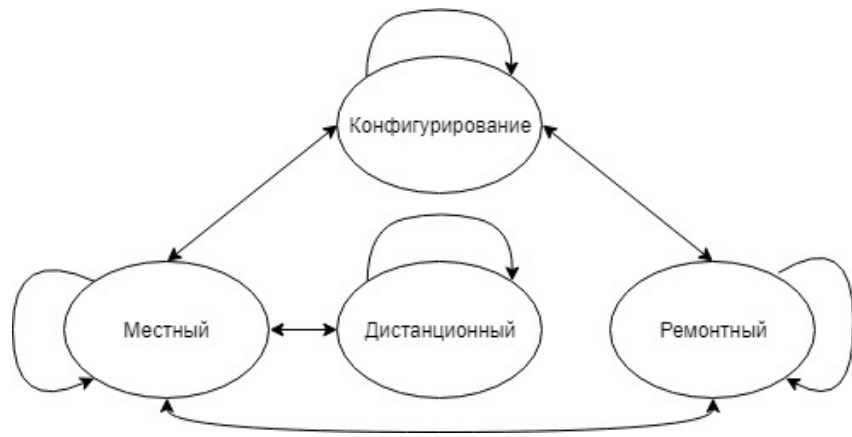


Рисунок 9. Режимы функционирования контроллера АСКУ ТО М

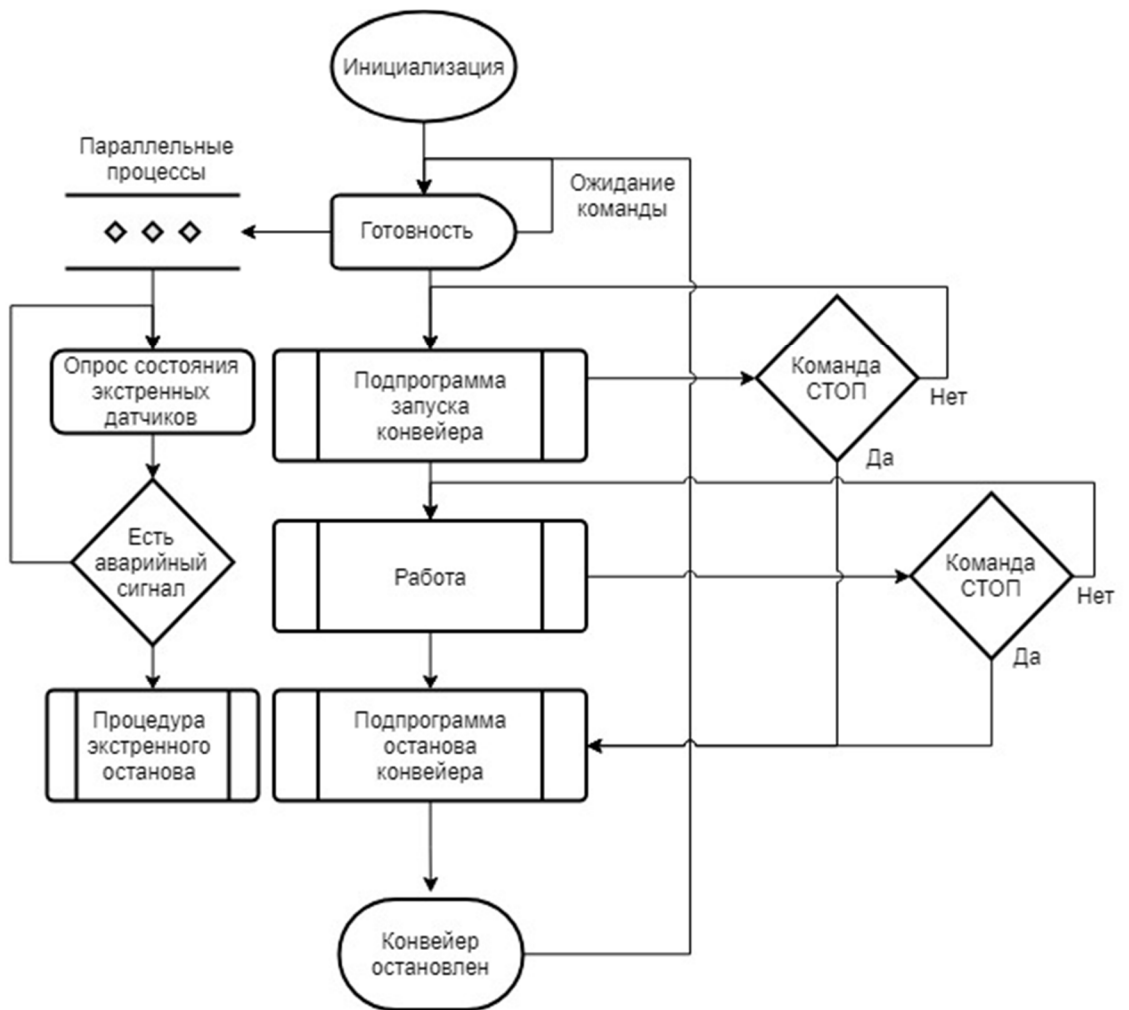


Рисунок 10. Общий алгоритм управления ленточным конвейером

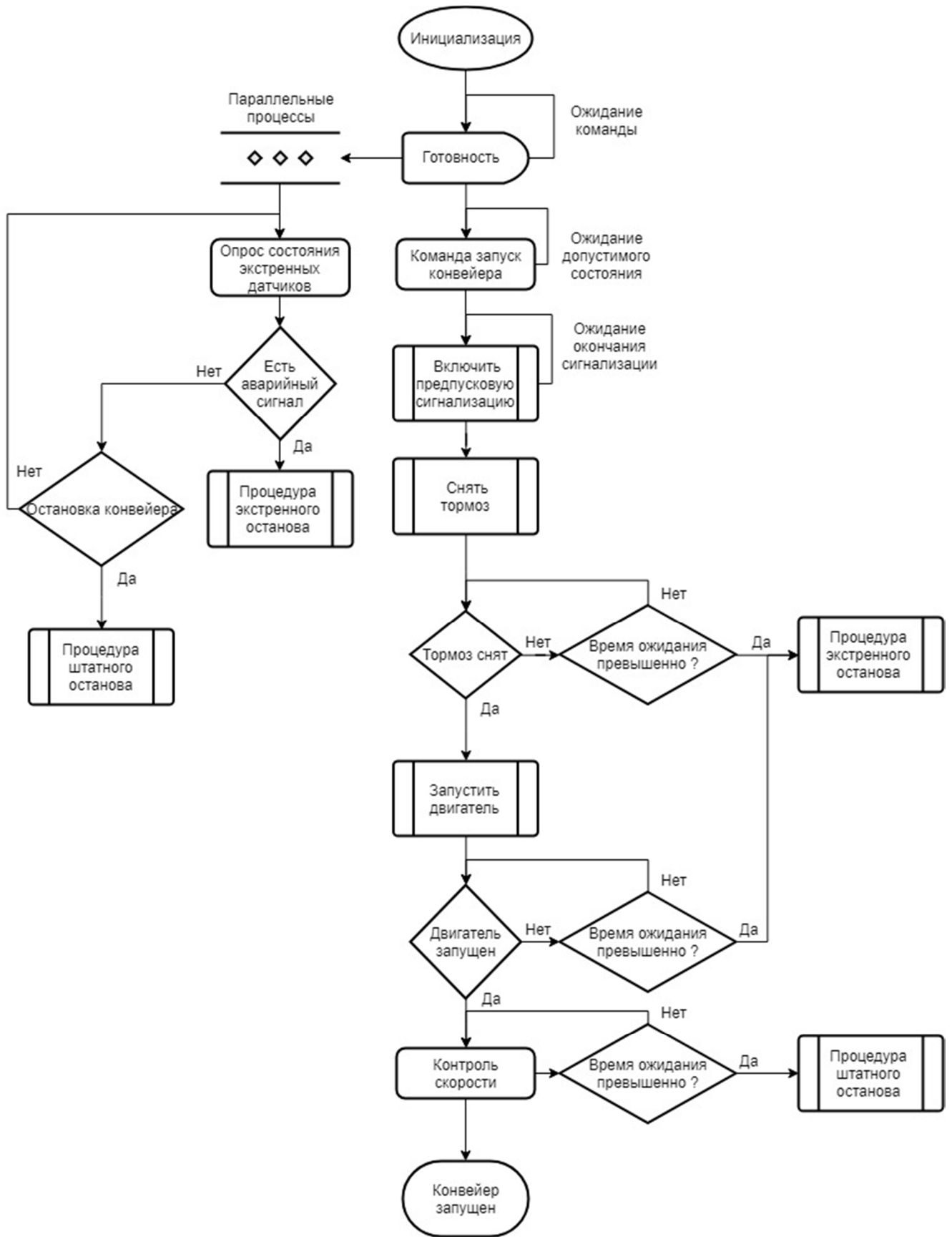


Рисунок 11. Алгоритм запуска ленточного конвейера

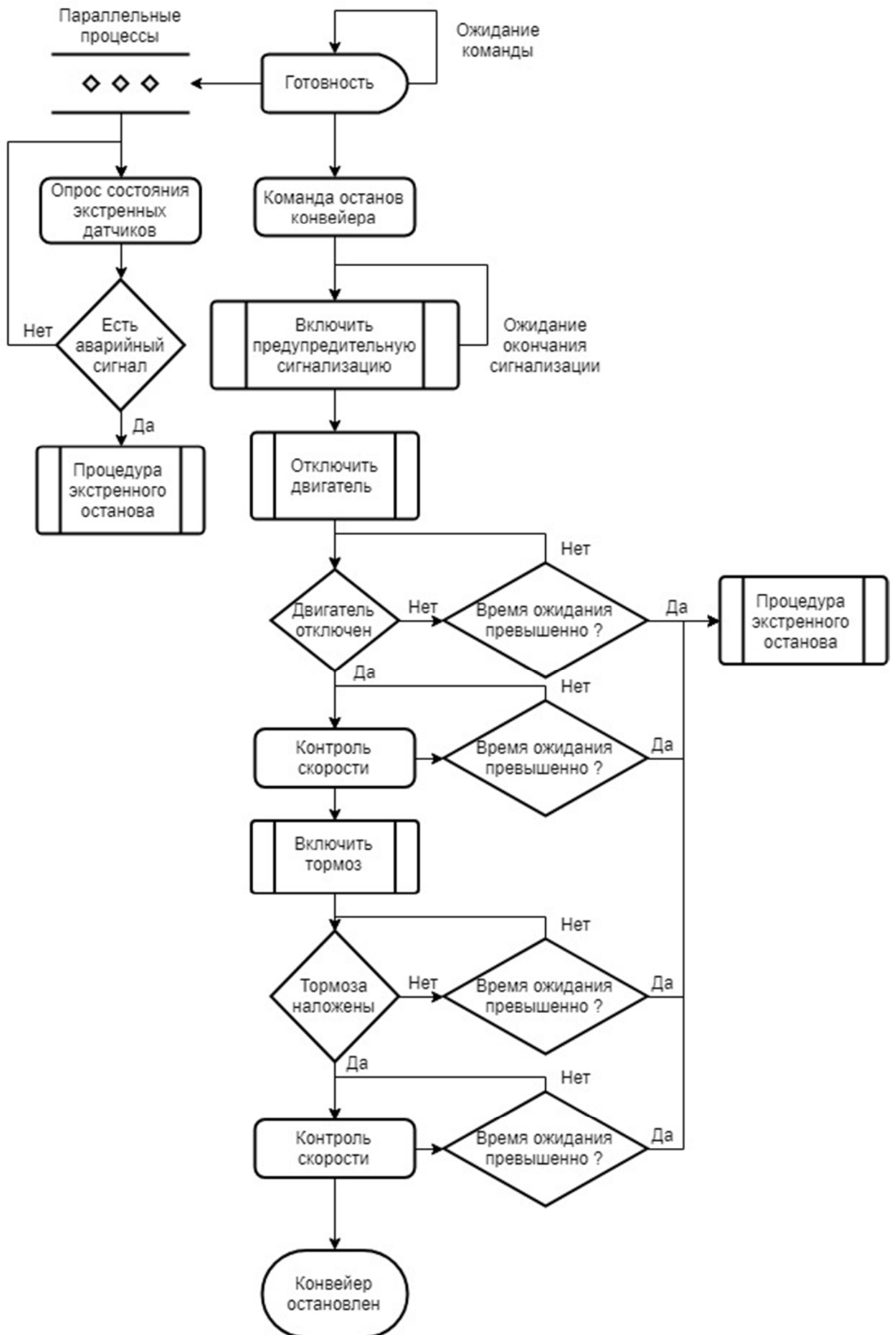


Рисунок 12. Алгоритм останова ленточного конвейера



На рисунке 13 приведен пример разработанной модели прикладного программного обеспечения контроллер АСУ ТП конвейерного транспорта.

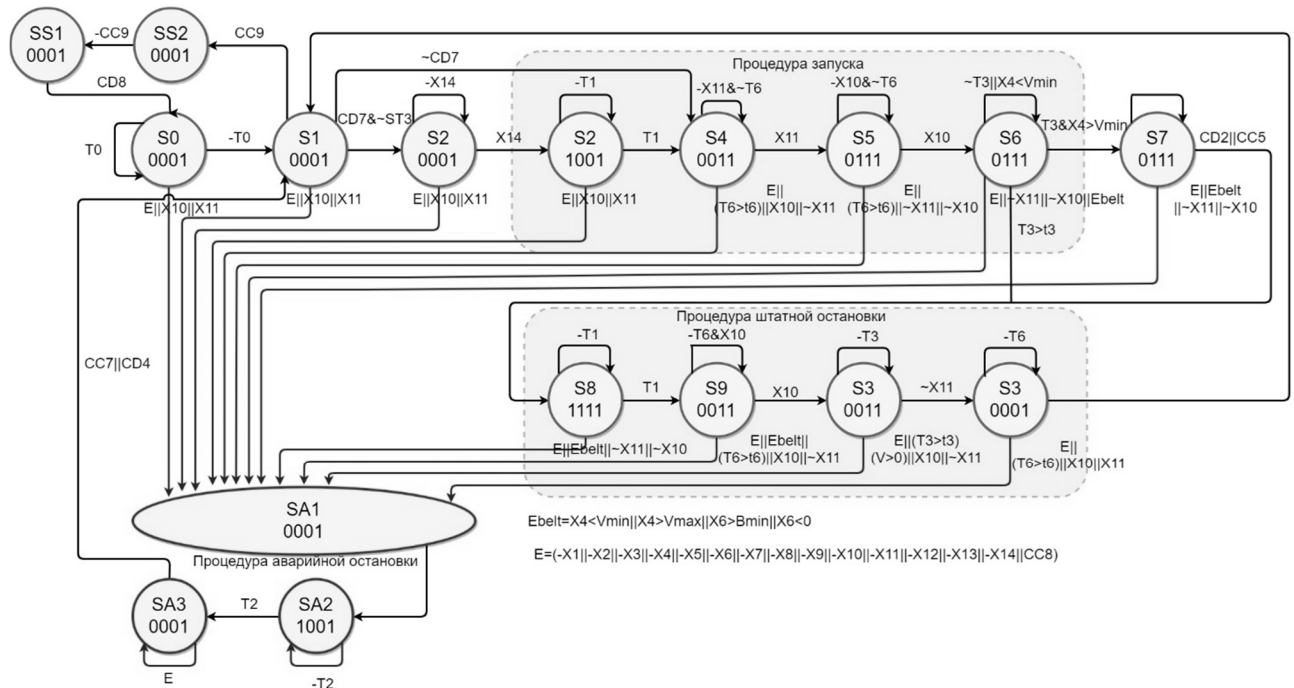


Рисунок 13. Пример модели прикладного программного обеспечения контроллера АСКУ ТО М системы конвейерного транспорта

Дополнительно к приведенному алгоритму, существуют конечные автоматы перевода между режимами по командам управления - нажатие кнопок управления на контроллере или подача команды диспетчера. Подача звукового сигнала происходит независимо от режима.

К основным классам МТО «Конвейер» относятся:

- ProductFlowOwner – класс представления грузопотока;
- IEnergyConsumerSimulation – интерфейс для организации подключения электроэнергии к МТО «Конвейер»;
- IProductAcceptingSimulation – интерфейс для организации грузопотока;
- ConveyorTemplateSubject – класс имитирующий логику функционирования ТО;
- ConveyorTemplateDisposition – класс задает команды управления, сигналы экстренных датчиков, сервисные команды МТО;

- ConveyorStartEvent, ConveyorStopEvent – классы состояний конечного автомата ТО;
- ConveyorTempatePort, WireConveyorTemplatePort, ConveyorTemplateBlockPort, ConveyorConveyorTemplatePort – классы входных и выходных портов МТО;
- ConveyorTemplateDescriptor – класс задает набор параметров МТО;
- ConveyorTemplateAnimation – класс содержит описание условного графического обозначения МТО и его анимации;
- FlowSetupDialogLauncher – класс диалога настройки сценария грузопотока (грузопоток еще может быть задан МТО «Забой», «Бункер» или «Конвейер» подключенных к входным портам);
- FlowScenarioDialog – класс диалога настройки параметров сценариев.

На рисунке 14 приведено условное графическое изображение (УГО) МТО «Конвейер». Условное графическое обозначение состоит из схематически изображенных габаритных размеров соответствующего ТО, анимированной конвейерной ленты (выполнена визуализация движения и транспортного грузопотока), точек соединения с другими МТО (две входные, выходная, электропитания).



Рисунок 14. Двумерное УГО МТО «Конвейер»

### 2.5.2. Бункер

Бункерные перегружатели предназначены для перегрузки транспортируемого полезного ископаемого с одного конвейера на другой и нормализации распределения массы вдоль конвейера. Бункерный перегружатель имеет одно состояние – работа. В параметрах МТО задается вместимость бункера и скорость перегрузки. На Рисунок 15 изображено двумерное УГО МТО бункера.

МТО «Бункер» осуществляет перегрузку с конвейера, подключенного к входу (северный порт), и перемещает на последующий конвейер (южный порт).

Процесс заполнения МТО «Бункер» анимирован. В качестве параметров инициализации можно установить начальное заполнение бункера полезными ископаемыми.

### 2.5.3. Забой

Забой представляет собой участок угольной шахты, в котором добывающий комбайн или другой механизм осуществляет процесс добычи полезных ископаемых.

Забой имеет два состояния работа и бездействие. Переходы между ними осуществляются при помощи ручного управления или в автоматическом режиме при возникновении соответствующих сигналов.

Объем полезного ископаемого в МТО «Забой» генерируется нормальным распределением случайных чисел. В качестве параметров модели вводятся параметры распределения. На рисунок 16 изображено двумерное УГО МТО «Забой». Выходной грузопоток поступает на подключенную к южному порту МТО «Конвейер».

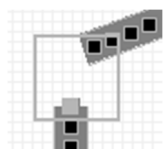


Рисунок 15. Двумерное УГО  
МТО «Бункер»

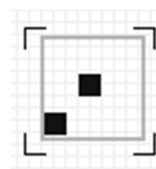
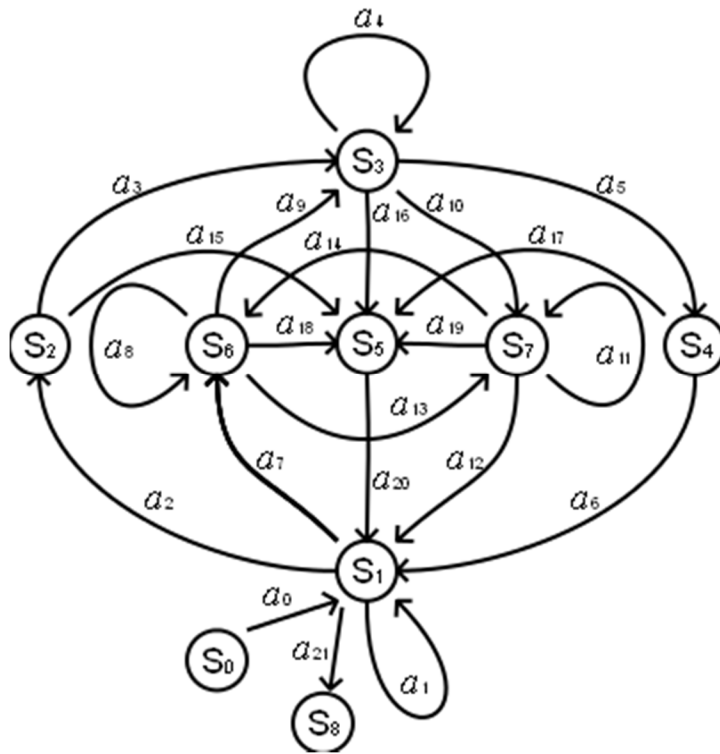


Рисунок 16. Двумерное УГО  
МТО «Забоя»

### 2.5.4. Описание имитационной модели системы конвейерного транспорта

Математическое описание имитационной модели конвейерной сети включает в себя модели технологического оборудования, описанные в предыдущей главе, а так же зависимости характерные для имитируемой системы. В формуле (14) приведено описание имитационной модели конвейерной сети, а графическое представление изображено на рисунке 17. Групповой пуск или остановка конвейерной сети выполняется в соответствии с заданной последовательностью конвейеров. Отдельный пуск конвейеров допускается если соблюдается порядок запуска конвейеров в сети.

Моделирование грузопотока представлено в разделе описания МТО «Конвейер» (13).



- $S_0$  – начальное состояние;  
 $S_1$  – конвейерная сеть остановлена;  
 $S_2$  – групповой пуск конвейерной сети;  
 $S_3$  – работа конвейерной сети;  
 $S_4$  – групповая остановка конвейерной сети;  
 $S_5$  – авария;  
 $S_6$  – пуск выбранного конвейера;  
 $S_7$  – остановка выбранного конвейера;  
 $S_8$  – окончание имитации конвейерной сети;
- $a_0$  – запуск имитации;  
 $a_1$  – ожидание команд «Пуск конвейерной сети» или «Пуск конвейера»;  
 $a_2$  – команда «Пуск конвейерной сети»;  
 $a_3$  – конвейерная сеть запущена;  
 $a_4$  – цикл функционирования конвейерной сети;  
 $a_5$  – команда «Остановка конвейерной сети»;  
 $a_6$  – конвейерная сеть остановлена;  
 $a_7$  – запуск одиночного конвейера;  
 $a_8$  – ожидание запуска следующего в цепочке конвейера;  
 $a_9$  – конвейерная сеть запущена;  
 $a_{10}$  – остановка одиночного конвейера;  
 $a_{11}$  – ожидание остановки следующего в сети конвейера;  
 $a_{12}$  – конвейерная сеть остановлена;  
 $a_{13}$  – остановка одиночного конвейера по команде в процессе пуска конвейерной сети;  
 $a_{14}$  – запуск одиночного конвейера по команде в процессе пуска конвейерной сети;  
 $a_{15} - a_{19}$  – получен сигнал аварии;  
 $a_{20}$  – экстренная остановка конвейерной сети и снятие аварийного сигнала;  
 $a_{21}$  – остановка имитации.

- $a_9$  – конвейерная сеть запущена;  
 $a_{10}$  – остановка одиночного конвейера;  
 $a_{11}$  – ожидание остановки следующего в сети конвейера;  
 $a_{12}$  – конвейерная сеть остановлена;  
 $a_{13}$  – остановка одиночного конвейера по команде в процессе пуска конвейерной сети;

Рисунок 17. Конечный автомат функционирования модели технологического процесса, состоящего из нескольких МТО «Конвейер»

$$CN = \{M, pr, L, F, SM\}, \quad (14)$$

где  $M$  – множество моделей технологического оборудования конвейерного транспорта,  $M = m_i$ , где  $i$  от 1 до  $n$  – количество моделей технологического оборудования, входящих в имитационную модель конвейерной сети;  $pr$  – порты представляют собой каналы передачи сигналов между моделями технологического оборудования. Связи между портами в имитационной модели технологического процесса задаются графическим способом при

соединении моделей технологического оборудования между собой;  $L$  – грузопоток, представленный в виде дискретных объемов;  $F$  – источник грузопотока;  $SM$  – конечный автомат функционирования модели конвейерной сети, описанный в виде (6).

Для моделирования процесса выработки угля в забое, как пример, взято стандартное нормальное распределение (математическим ожиданием равным 0 и стандартным отклонением равным 1). Метод моделирования стандартного нормального распределения – преобразование, предложенное Боксом-Мюллером (15).

$$F = (F_{\text{ср.}} + m * Z_i) * p, \quad (15)$$

где  $F_{\text{ср.}}$  – заданное математическое ожидание;  $m$  – масштаб приведения случайной величины к значению математического ожидания;  $p$  – процент мощности функционирования технологического оборудования моделируемого забоя;  $x$  и  $y$  независимые случайные величины, равномерно распределённые на отрезке  $[-1, 1]$ , такие, что должно выполняться условие  $0 < x^2 + y^2 \leq 1$ ;  $Z_i$  случайная величина выбранная из двух случайных величин  $Z_0 = x * \sqrt{-2 \ln s/s}$  и  $Z_1 = y * \sqrt{-2 \ln s/s}$ , где  $s = x^2 + y^2$ .

Разработан конечный автомат (16) описывающий функционирование имитационной модели конвейерной сети (рисунок 20).

$$SM = \{S, A, S_0, g, F\}, \quad (16)$$

где  $S = \{S_1, \dots, S_7\}$  – состояния имитационной модели конвейерной сети,  $S_0$  – начальное состояние, формирующееся при запуске имитации,  $A = \{a_0, \dots, a_{21}\}$  – входной алфавит автомата;  $g$  – функция переходов, заданная графическим способом;  $F = \{S_8\}$  – конечное состояние.

## **2.6. Имитационные модели технологического оборудования подсистемы электроснабжения**

Элементы сети электроснабжения угольной шахты добавлены для обеспечения логического функционирования МТО систем конвейерного транспорта и водоотлива.

### **2.6.1. Генератор**

МТО «Генератор» электроэнергии служит источником электроэнергии и является аналогом федеральной электросети.

МТО «Генератор» имеет одно состояние «работа» и один выходной ресурс «электроэнергия». Потребители подключаются к выходному порту модели.

На рисунке 18 изображено двумерное УГО МТО «Генератор».

### 2.6.2. Линия электропередачи

МТО «Линия электропередачи» обеспечивает подключение потребителей к генератору, имеет одно состояние «работа», один входной и выходной ресурс «электроэнергия». Источник электроэнергии, например, МТО «Генератор», подключается к входу («южный порт»), потребители к выходу («северный порт»). Для имитации неполадок введена команда управления «поломка линии электропередачи». В случае активации этой команды – электроэнергия перестает поступать к потребителю. Двумерное УГО МТО приведено на рисунке 19.

### 2.6.3. Трансформатор

Трансформатор преобразует высшее напряжение – понижает уровень входного напряжения до заданного значения. При создании имитационных моделей технологических процессов МТО «Трансформатор» является распределителем электроэнергии для других МТО. Для выполнения имитационных экспериментов есть команды управления, которые позволяют переводить МТО «Трансформатор» из одного состояния в другое (исправное или аварийное). В аварийном состоянии или выключенном передача электроэнергии в сеть низкого напряжения не осуществляется. На рисунок 20 приведено двумерное УГО МТО «Трансформатор».



Рисунок 18. Двумерное УГО МТО «Генератор»



Рисунок 19. Двумерное УГО МТО «Линия электропередачи»



Рисунок 20. Двумерное УГО МТО «Трансформатор»

## 2.7. Имитационные модели технологического оборудования системы водоотлива

Система водоотлива угольной шахты предназначена для обеспечения безопасного уровня воды в выработках, которая поступает из источников технологических и грунтовых вод. Перемещаемая жидкость так же как уголь, представлена единичными объемами.

### **2.7.1. Источник водопритока**

Источник водопритока представляет собой источник грунтовых или технологических вод. Параметром модели водопритока является объем поступающей воды. Имеет состояние «работа» и выходной ресурс - водоприток.

Объем водопритока в единицу времени рассчитывается как выборка из нормального распределения с заданными медианой и дисперсией, либо может быть задано фиксированным средним значением. На рисунке 21 изображено двумерное УГО МТО «Водоприток».

### **2.7.2. Резервуар**

Резервуар в условиях горных выработок представляет собой емкость для сбора грунтовых вод. МТО имеет одно состояние - работа. Параметром МТО является объем резервуара. На рисунок 22 изображено двумерное УГО МТО «Резервуар».

МТО «Резервуар» осуществляет сбор грунтовых вод, поступающих от МТО «Водопровод». В случае переполнения резервуара, происходит переливание излишков жидкости в выработку (представленной на модели в виде МТО «Резервуар» с соответствующим объемом).

### **2.7.3. Водопровод**

Водопровод физически может представлять собой случаев канавку, желоб прокопанный в земле или трубу. Является каналом транспортировки жидкости. Скорость транспортировки задается либо источником водопритока, либо перекачивающим насосом. МТО «Водопровод» имеет одно состояние – рабочее. Введена возможность отдать команду управления для МТО «водопровод» – поломка. В этом случае транспортировка жидкости нарушается. Источник подключается к южному порту, приемник к северному. На рисунок 23 изображено двумерное УГО МТО «Водопровод».

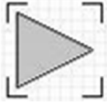


Рисунок 21.  
Двумерное УГО МТО  
«Водоприток»



Рисунок 22.  
Двумерное УГО МТО  
«Резервуар»



Рисунок 23. Двумерное  
УГО «Водопровод»

#### 2.7.4. Насос

По рассмотренной ранее методике создана МТО «Насос». Параметры этой модели приведены в таблице 13. На рисунке 24 приведено двумерное УГО МТО «Насос».

Таблица 13. Параметры МТО «Насос»

Наименование параметра	Значение
Состояние насоса	Код состояния
Команда верхнего уровня	Код команды
Состояние аналоговых датчиков	Массив
Состояние дискретных датчиков	Массив
Геометрическое положение насоса	Координаты
Параметры двигателя	Двигатель
Параметры насоса	Насос

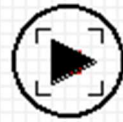


Рисунок 24. Двумерное УГО МТО «Насос»

Алгоритм управления насоса изображен на рисунках 25 и 26. Структура и режимы управления аналогичны конфигурации контроллера АСКУ ТО М конвейерного транспорта.



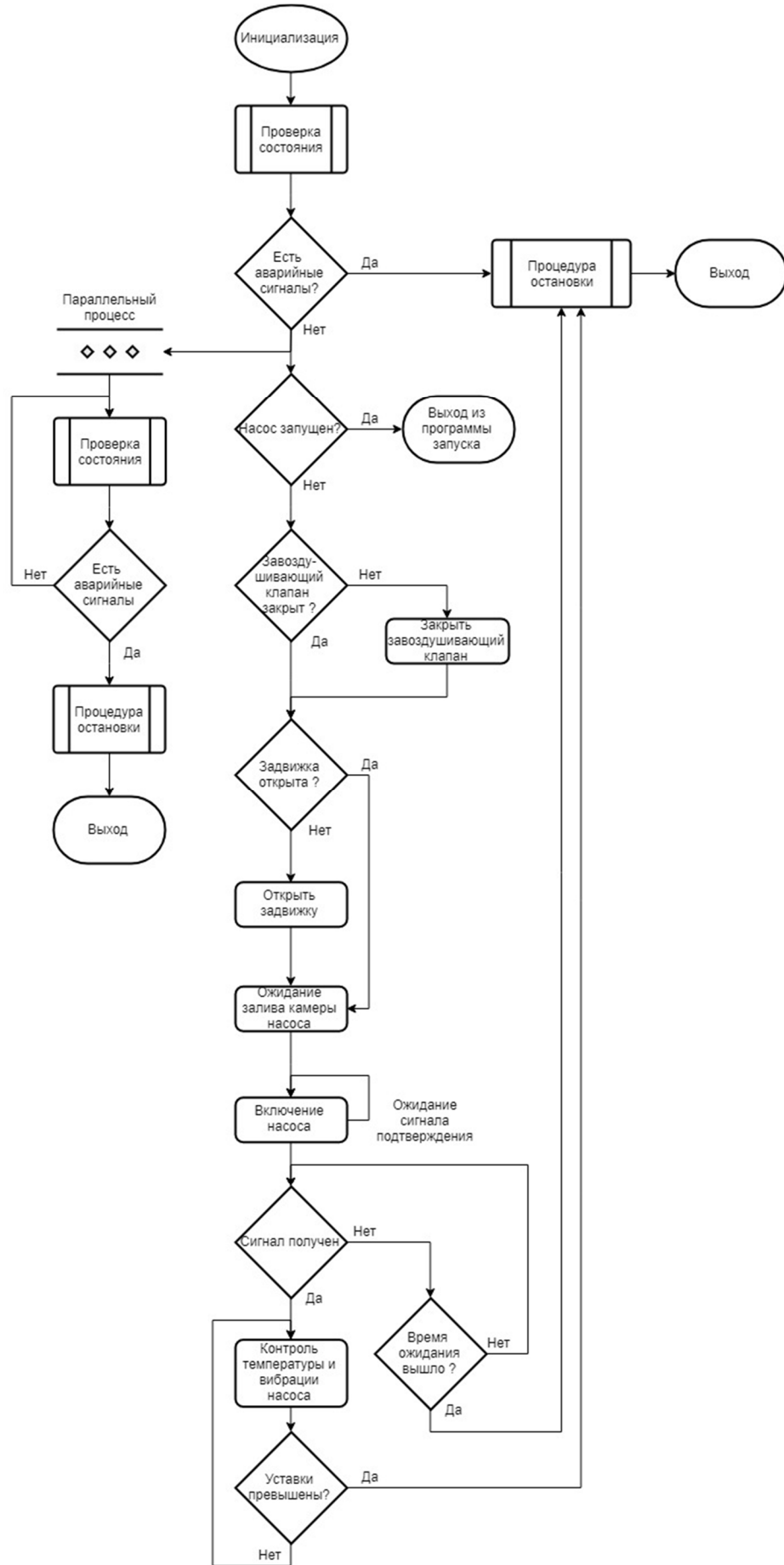


Рисунок 25. Алгоритм включения насоса

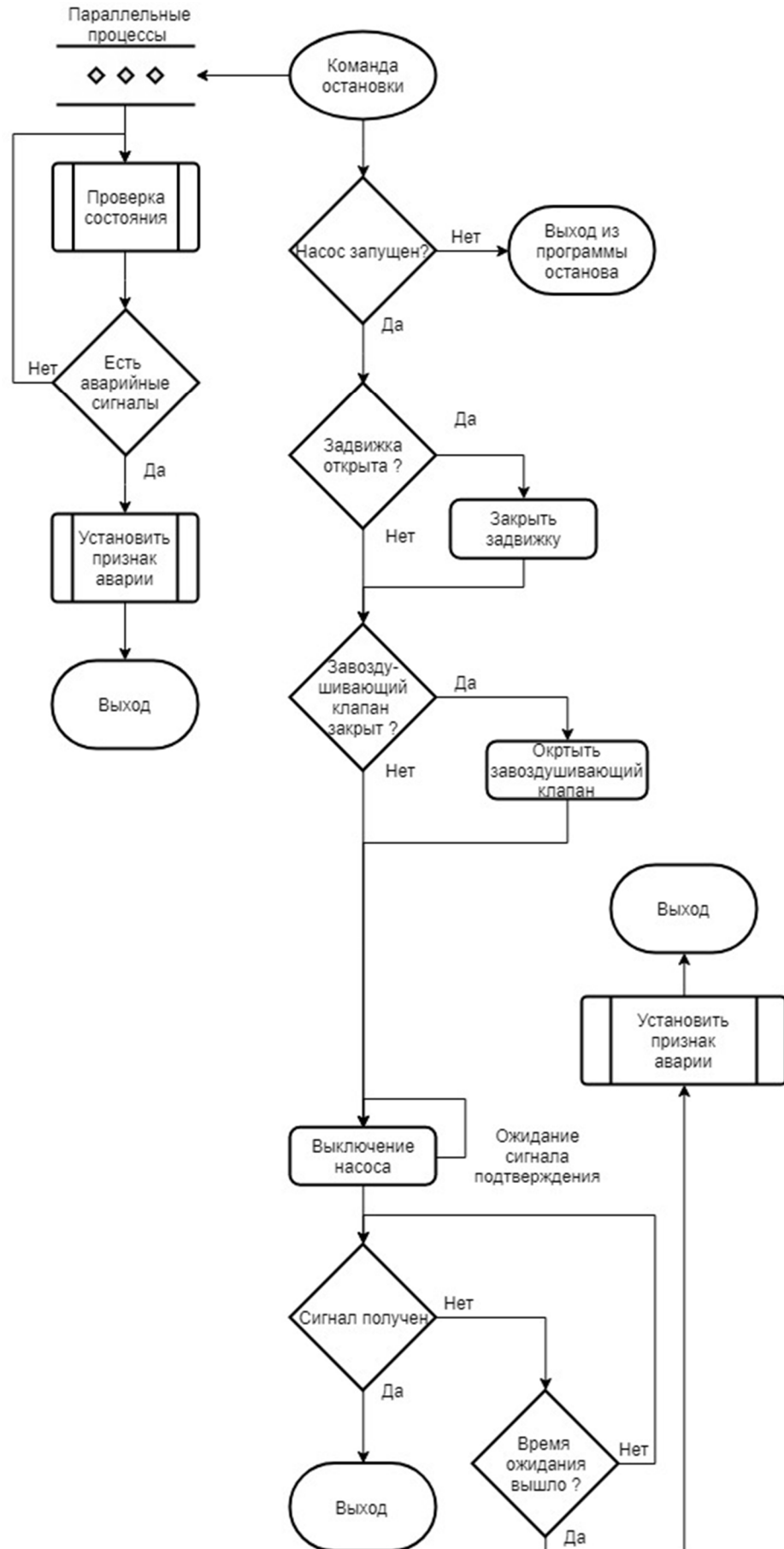


Рисунок 26. Алгоритм выключения насоса

Разработка модели прикладного программного обеспечения для МТО «Насос» выполнена так же как для МТО «Конвейер».

## 2.8. Примеры созданных моделей технологических процессов угольной шахты

Разработанные МТО позволили реализовать генерацию сигналов датчиков ТО, управляющих воздействий и команд управления АСУ ТП.

С помощью разработанной специализированной библиотеки МТО систем угольной шахты созданы мнемосхемы имитационных моделей систем конвейерного транспорта и водоотлива (рисунок 27 и 28) угольной шахты [10,14].

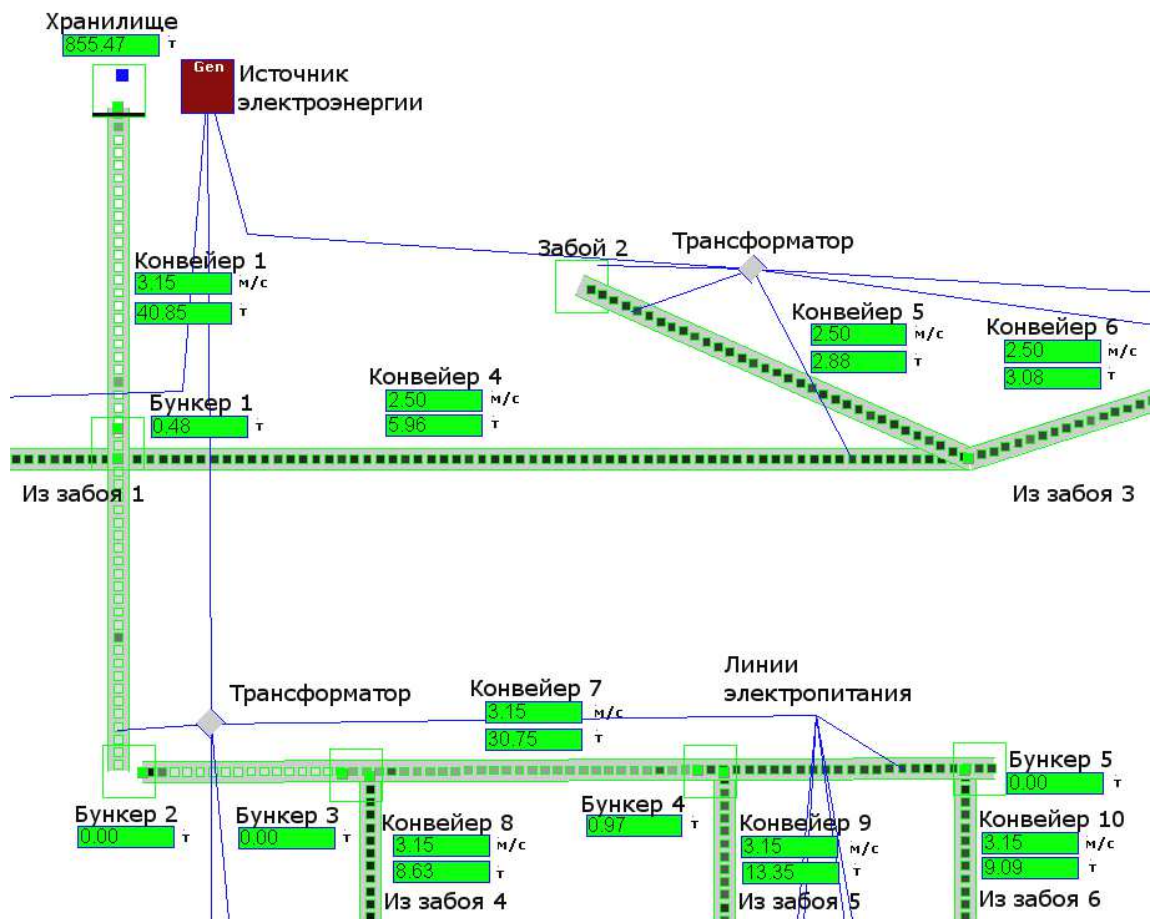


Рисунок 27. Фрагмент мнемосхемы имитационной модели конвейерной сети системы подземного транспорта угольной шахты

Созданные МТО применены в ряде других проектов для имитации технологических процессов: добычи угля [17,18]; функционирования нефтегазодобывающего предприятия [245]; добыча угля с применением перспективной технологии и технологического оборудования шагающая крепь [1].

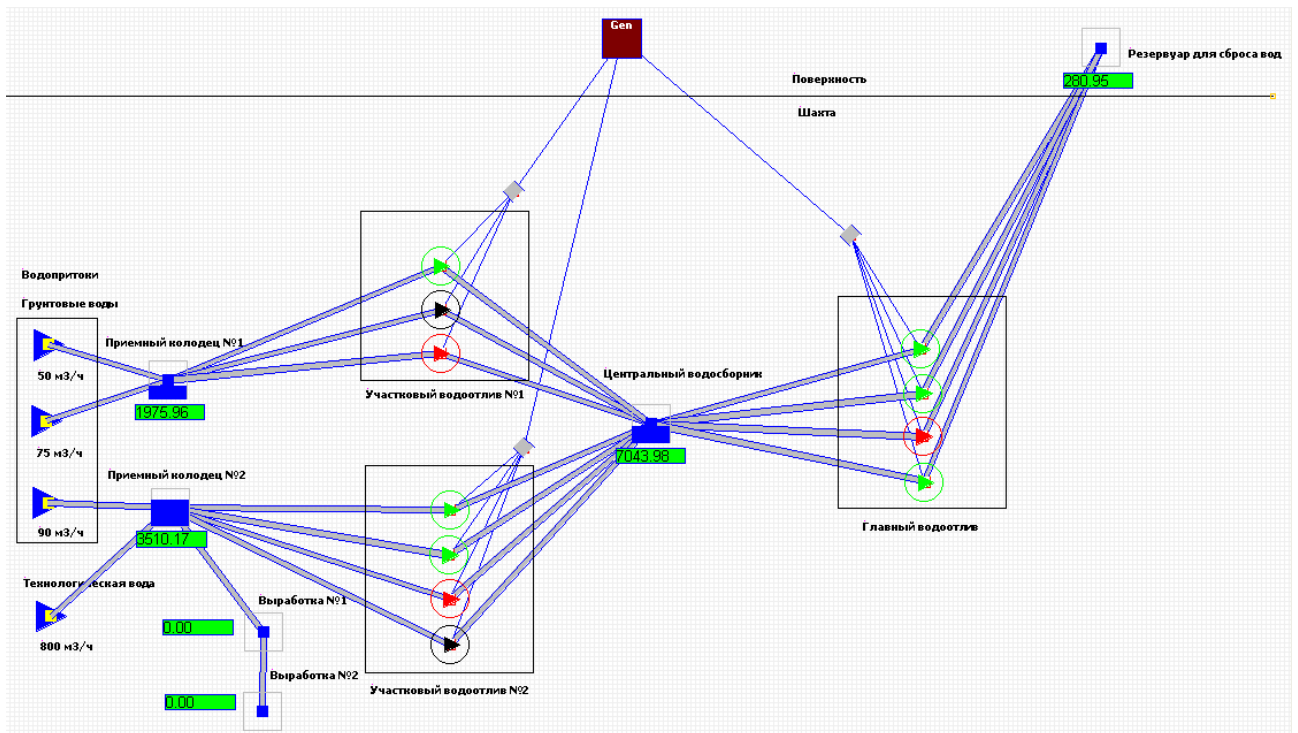


Рисунок 28. Фрагмент мнемосхемы имитационной модели системы водоотлива угольной шахты

## 2.9. Выводы

1. Угольная шахта представляет собой сложную систему, состоящую из групп объектов одинаковых типов. События и процессы, возникающие во время выполнения технологических операций, носят дискретный характер или могут быть сведены к такому. Для имитационного моделирования ТО эффективно применить подход дискретно-событийного моделирования.

2. Создана библиотека МТО систем конвейерного транспорта и водоотлива имитирующая входные и выходные сигналы управляющего контроллера [12].

3. Разработана структура усовершенствованной МТО в МТСС и методика создания библиотечных элементов с ее использованием для целей отладки и тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП.

4. Разработанные МТО могут быть применены для других областей промышленности, после адаптации сигналов датчиков, команд управления и управляющих воздействий.

### **Глава 3. Имитационный программно-аппаратный комплекс для тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП**

Основное назначение имитационного программно-аппаратного комплекса – это проведение тестовых испытаний прикладного программного обеспечения АСУ ТП на уровне физических сигналов до начала проведения пуско-наладочных работ.

Комплекс осуществляет тестирование прикладного программного обеспечения по принципу замещения реальных сигналов от датчиков существующего технологического оборудования на электрические аналоги, сформированные на основе моделируемых сигналов технологического оборудования [11,20].

В состав комплекса входят следующие основные функциональные блоки[2]:

- **рабочая станция оператора имитационной модели**, содержащая среду имитационного моделирования MTSS с расширенными функциональными возможностями. В состав MTSS входят имитационные модели технологических процессов, модуль настройки подключений сигналов (задает соответствие между модельными и физическими сигналами), менеджер связи, сервисное программное обеспечение (в его функции входит формирование статистики о процессе тестирования, формирование сценариев работы технологического оборудования и др.);
- **среда передачи данных**, использующаяся для передачи данных между рабочей станцией оператора имитационной модели, блоком формирования физических сигналов, блоком тестируемого оборудования АСУ ТП;
- **блок преобразования физических сигналов (БПФС)**, предназначенный для формирования и анализа физических сигналов, генерируемых на основе имитационной модели или тестируемым оборудованием;
- **блок оборудования АСУ ТП**, содержащий один или несколько компонентов АСУ ТП: программируемые логические контроллеры, модули ввода/вывода, рабочую станцию оператора.

## 2.1. Логическое функционирование комплекса

Логическое функционирование имитационного программно-аппаратного комплекса для тестирования прикладного программного обеспечения состоит из нескольких циклов – главного и вспомогательных.

На рисунке 29 представлен главный цикл функционирования имитационного программно-аппаратного комплекса.

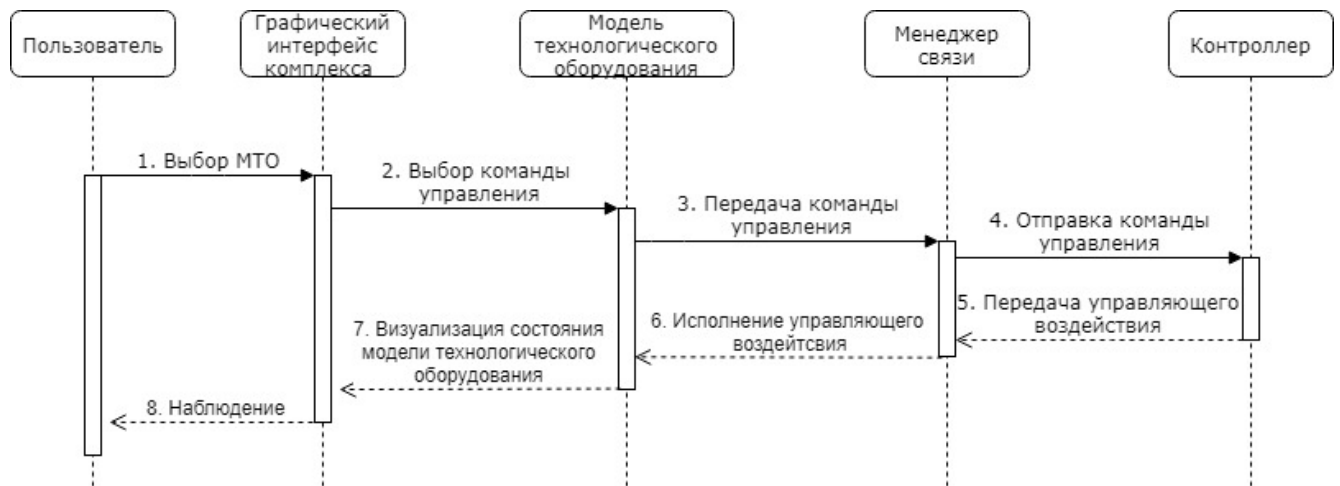


Рисунок 29. Диаграмма последовательности функционирования имитационного программно-аппаратного комплекса при диспетчерском управлении комплексом

Процесс тестирования начинается с подачи команды управления в МТСС в автоматическом или ручном режимах. Затем команда обрабатывается в выбранной МТО и далее поступает в менеджер связи, который обеспечивает взаимодействие между имитационной моделью системы и программируемым логическим контроллером и др. программными и/или аппаратными системами. Контроллер формирует управляющие воздействия в соответствии с поступившей командой и сигналами датчиков имитируемого технологического оборудования. Имитационная модель интерпретирует управляющие воздействия от АСУ ТП и визуализирует изменившееся состояние имитируемого технологического оборудования.

К вспомогательным циклам функционирования комплекса относятся – обновление таблицы сигналов, считывание управляющих воздействий от контроллера АСУ ТП, формирование физически сигналов датчиков.

На рисунке 30 приведен общий алгоритм функционирования программного обеспечения имитационного программно-аппаратного комплекса.

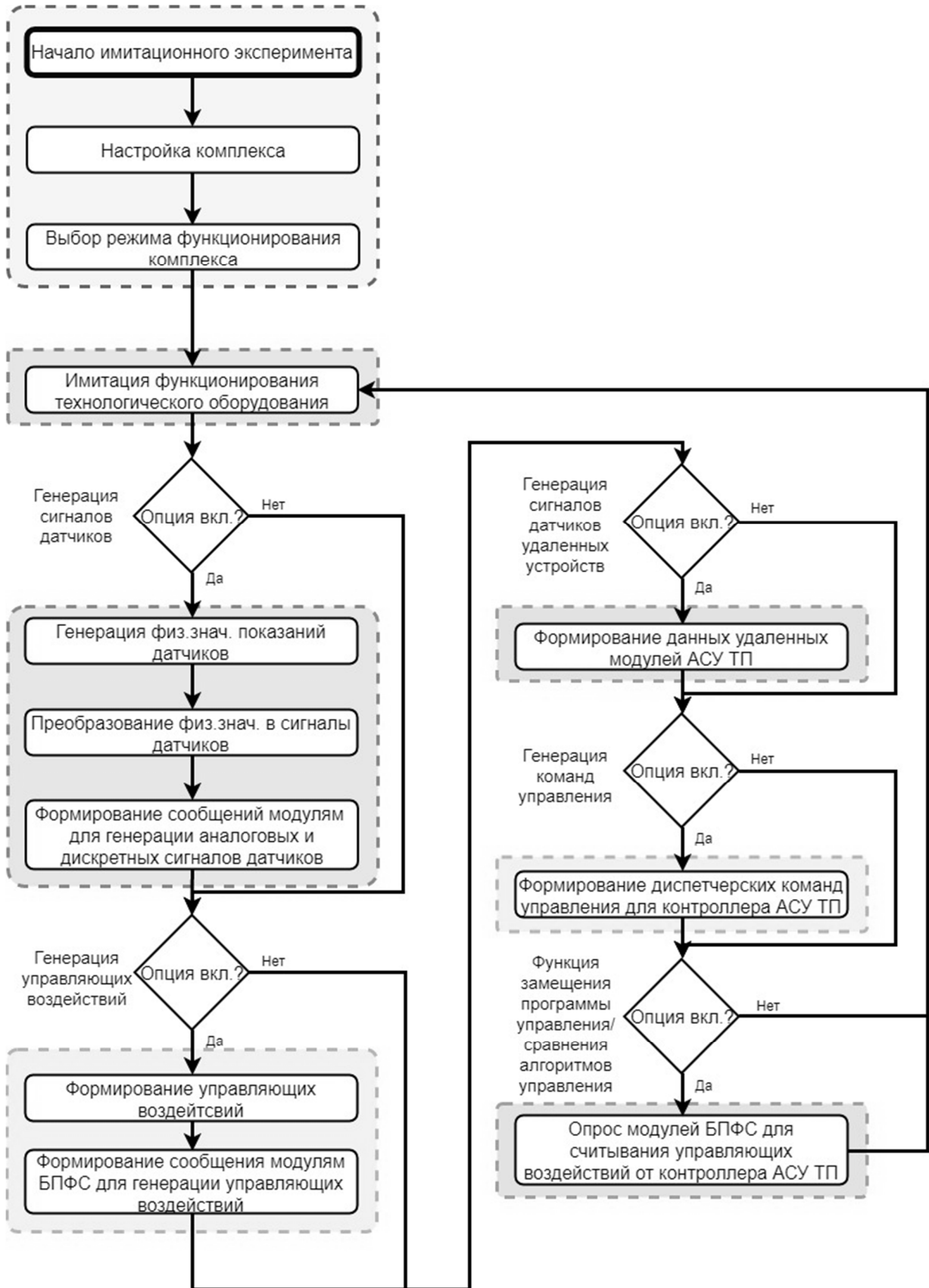


Рисунок 30. Общий алгоритм имитационного программно-аппаратного комплекса

Алгоритм комплекса состоит из блоков, осуществляющих функции: настройки комплекса и имитационной модели, имитацию технологического процесса или оборудования, имитацию АСУ ТП, эмуляцию АСУ ТП, обработку управляющих воздействий АСУ ТП.

Реализована единая конфигурация комплекса и имитационной модели. Можно задать несколько режимов. Алгоритм организован так, что позволяет изменить режим имитационного эксперимента, без внесения дополнительных данных.

## **2.2. Структура комплекса**

Имитационный программно-аппаратный комплекс [15] для тестирования прикладного программного обеспечения состоит из программной и аппаратной частей. В состав программной части входят следующие программные модули: среда имитационного моделирования MTSS [154], менеджер связи, имитационные модели модулей ввода/вывода АСУ ТП, имитационные модели технологических процессов, МТО, алгоритмы прикладного программного обеспечения АСУ ТП (диспетчерского и контроллерного уровней), SCADA. В состав аппаратной части входят следующие функциональные модули: рабочая станция оператора SCADA [8], рабочая станция оператора имитационной модели, среда передачи данных и БПФС, компоненты тестируемой АСУ ТП [237,240,241,246,247]. БПФС формирует на основе полученных информационных сигналов соответствующие физические аналоговые или дискретные сигналы. В состав аппаратной части могут входить реальные датчики. Имитационные модели модулей ввода-вывода выполняют функцию эмуляции отсутствующих или внешних модулей ввода-вывода тестируемой системы автоматизации. На рисунках 31 и 32 изображены соответственно структуры программной и аппаратной частей имитационного программно-аппаратного комплекса.



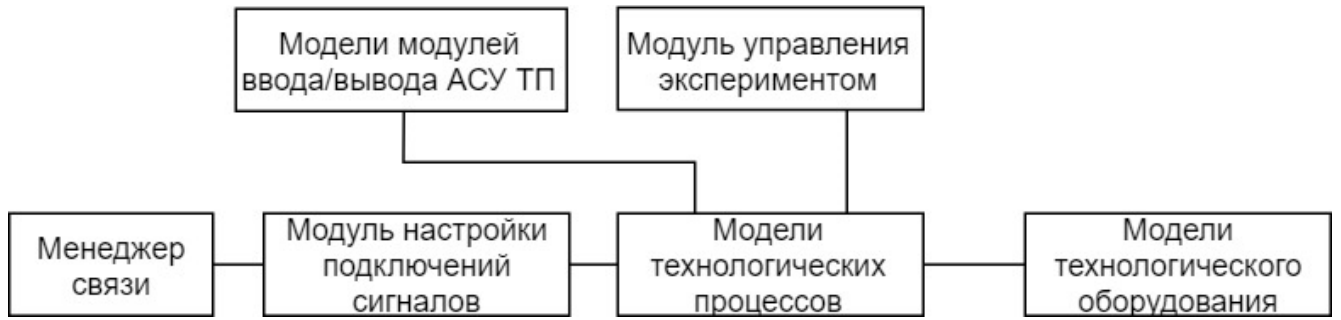


Рисунок 31. Структура программной части имитационного программно-аппаратного комплекса

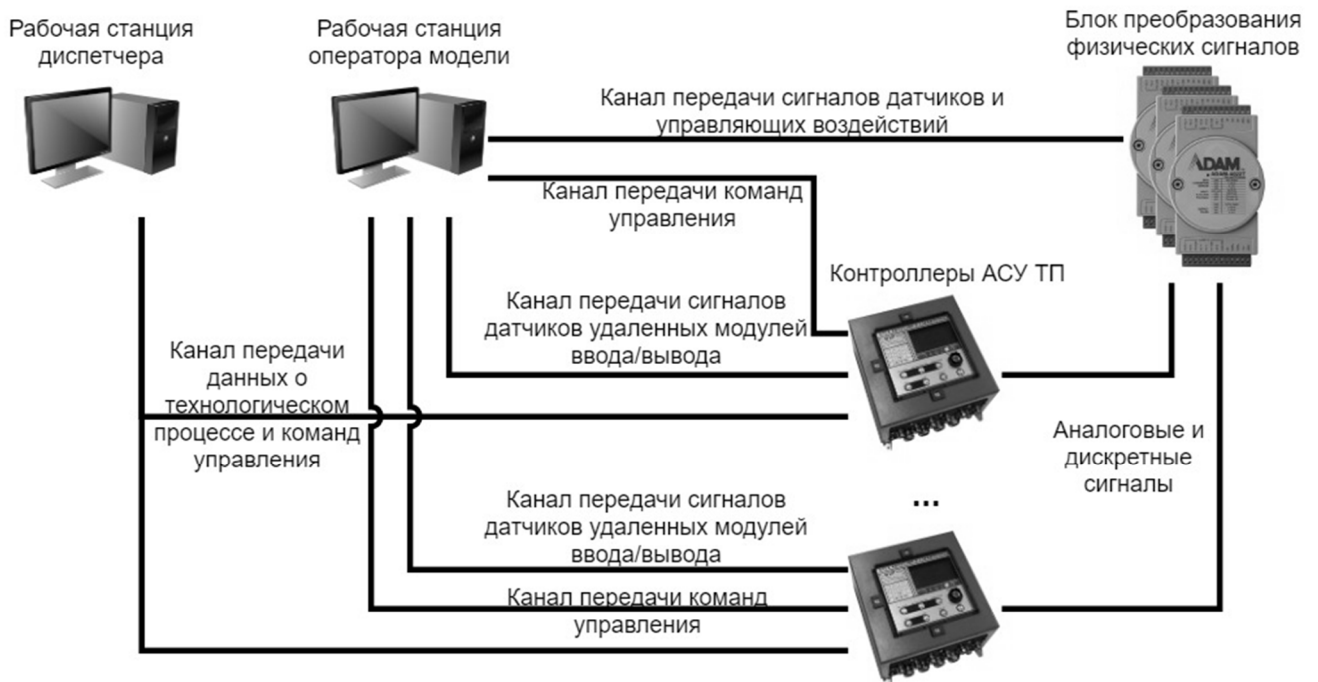


Рисунок 32. Структура аппаратной части имитационного программно-аппаратного комплекса

На рисунке 33 изображен внешний вид созданного комплекса.

Программные модули, изображенные на рисунке 31, разработаны для использования в среде имитационного моделирования MTSS, выполняют имитацию состояния датчиков, формирование управляющей информации для передачи в аппаратную часть, чтение сообщений от тестируемого оборудования. Передача сигналов имитируемого технологического оборудования выполняется в формате тестируемой АСУ ТП.

Сокращение времени имитационного эксперимента в реализованном комплексе достигается за счет применения проблемно-ориентированных МТО,

реализации глобального управления функциями комплекса (включение или отключение генерации тестовых сигналов датчиков, модели прикладного программного обеспечения, функций диспетчера).



Рисунок 33. Имитационный программно-аппаратный комплекс тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП

Среда передачи данных в имитационном программно-аппаратном комплексе реализована на основе интерфейса RS-485. Протоколы обмена данными – Modbus RTU, ADAM ASCII, протокол на базе строковых сообщений.

В разработанном комплексе реализовано три канала передачи данных: обработка состояний датчиков, отправка команд управления диспетчерского уровня АСУ ТП и считывание состояний тестируемого контроллера, эмуляция удаленных модулей ввода-вывода тестируемой системы автоматизации.

Для реализации связи контроллера непосредственно с датчиками и для передачи управляющих воздействий применяются модули формирования дискретных и аналоговых сигналов. В качестве элементной базы таких модулей выбраны контроллеры фирмы Advantech. В состав комплекса так же входят специализированные модули для генерации частотных и резистивных сигналов, соответственно датчиков скорости и заштыбовки конвейеров.

### 2.3. Модификация структуры

С развитием систем автоматизации угольных шахт в ИВТ СО РАН [8,246,247] на контроллеры АСУ ТП стали возлагаться все более сложные алгоритмические и функциональные задачи.

Разработка новой системы автоматизации, в которую планируется включить компоненты, разработанные ранее для других систем или функционирующие на объекте, требует проведения проверки совместимости компонентов в рамках созданной единой системы автоматизации.

Интеграция новой системы автоматизации или ее компонентов требует внесения изменений в программное или аппаратное обеспечение существующей АСУ ТП, что во время пуско-наладочных работ на объекте замедляет процесс внедрения этих систем, а так же может привести к аварийным ситуациям. В связи с этим на этапе проверки АСУ ТП необходимы не только отладка и тестирование, но и контроль совместимости созданных компонентов системы автоматизации с компонентами других версий и исполнений, функционирующих на действующем объекте.

В рамках выполнения диссертационного исследования была выполнена модификация метода Hardware-in-The-Loop (HiL) подхода «модельно-ориентированного проектирования» [9,21,22]. Метод HiL заключается в автономном тестировании прикладного программного обеспечения АСУ ТП сигналами, числовые значения которых формируются с использованием математической модели, а преобразование модельных сигналов в физические осуществляется соответствующими преобразователями.

Метод модифицирован таким образом, что для тестирования прикладного программного обеспечения контроллерного уровня наряду с математической моделью используется параллельно подключенный эталонный контроллер другой версии этой же АСУ ТП или другой модели изготовления. Это позволяет выполнить проверку и добиться идентичного функционирования тестируемого и эталонного контроллеров на одних и тех же входных сигналах и командах управления. На рисунке 34 приведена схема модифицированного имитационного

программно-аппаратного комплекса, а на рисунке 35 взаимодействие программных модулей в режиме сравнения управляющих воздействий.

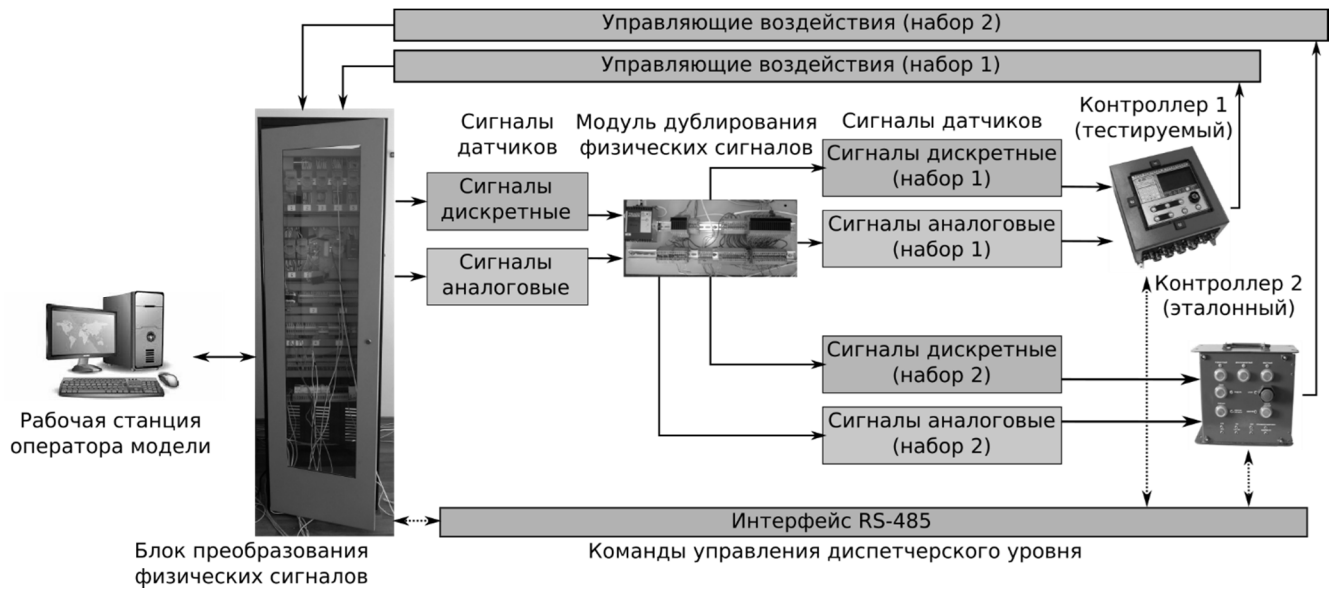


Рисунок 34. Модифицированная структура имитационного программно-аппаратного комплекса

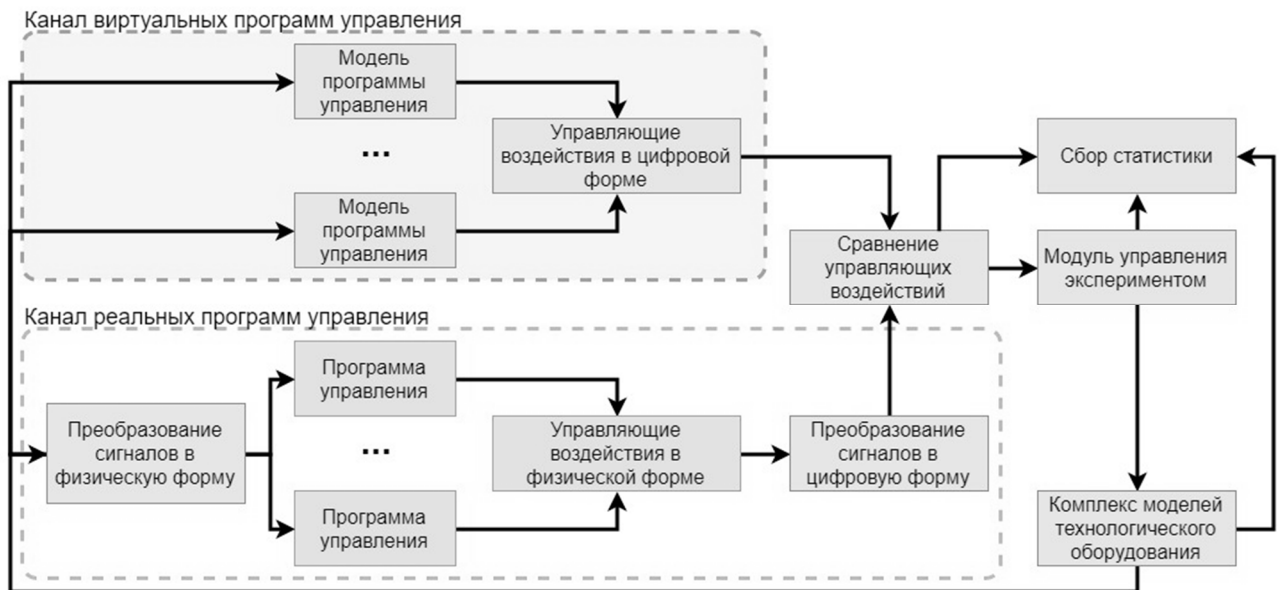


Рисунок 35. Структура взаимодействия программных модулей комплекса в режиме сравнения управляющих воздействий

Имитационная модель системы, визуально представляется мнемосхемой, содержащей набор графических обозначений, соединенных между собой в соответствии с технологическим процессом. Она генерирует виртуальные сигналы, которые поступают в блок преобразования физических сигналов по интерфейсу

RS-485 в формате строкового протокола. Блок преобразования физических сигналов генерирует электрические аналоги сигналов датчиков и преобразует в цифровую форму сигналы управления тестируемого оборудования. Модуль дублирования физических сигналов выполняет дублирование сигналов аналоговых и дискретных датчиков. После этого сигналы датчиков синхронно подаются в Контроллер 1 (тестируемый) и Контроллер 2 (эталонный). Команды управления диспетчерского уровня АСУ ТП передаются в контроллеры через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus. Преобразованные в цифровую форму сигналы управления передаются в имитационную модель системы, где в специализированном модуле осуществляется сравнение сигналов от Контроллера 1 и Контроллера 2, который в данном случае играет роль эталонного. Имитационная модель системы интерпретирует сигналы управления, полученные от тестируемого контроллера (Контроллер 1).

В отличие от классической реализации HiL в данной схеме добавлены модули дублирования физических сигналов и модуль сравнения управляющих воздействий, формируемых тестируемым и эталонным контроллерами.

Анализ идентичности функциональных возможностей контроллеров состоит из следующих шагов: запуск имитационной модели, генерирующей команды управления для контроллеров и сигналы датчиков; формирование управляющих сигналов, поступающих непосредственно в контроллеры, и сигналов датчиков, которые дублируются и после этого поступают в контроллеры; сопоставление управляющих сигналов контроллеров в модуле сравнения управляющих воздействий. При идентичных входных воздействиях и различных выходных управляющих сигналах фиксируется ошибочная ситуация.

Модулем дублирования физических сигналов осуществляется дублирование дискретных (кабель-троссовый выключатель, контроль схода ленты, устройство автоматического пожаротушения и т.п.) и аналоговых (датчик скорости ленты или барабана, датчик температуры, датчик заштыбовки и т.п.) сигналов. Реализовано дублирование частотных и токовых сигналов.

## **2.4. Реализация компонентов имитационного программно-аппаратного комплекса**

Имитационный программно-аппаратный стенд содержит следующие основные компоненты: среда передачи данных, модули блока преобразования физических сигналов, блок дублирования сигналов датчиков, программное обеспечение комплекса.

### **2.4.1. Среда передачи данных**

Для организации среды передачи данных выбран интерфейс RS-485, как наиболее часто применяемы при проектировании АСУ ТП. Кроме того, контроллер АСКУ ТО М для обмена информацией с диспетчерским уровнем использует именно этот интерфейс. Применен преобразователь интерфейса USB-RS485 фирмы «Болид».

Основные технические характеристики преобразователя интерфейса следующие:

- напряжение питания - USB порт персонального компьютера;
- потребляемый ток, не более - 200 мА;
- скорости передачи данных, Бод - 110, 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200.

В качестве основного протокола имитационного программно-аппаратного комплекса выбран ModBus [248]. ModBus – это открытый промышленный коммуникационный протокол, который применяется для передачи данных по интерфейсам связи RS-485, RS-232, TCP/IP и др. В АСКУ ТО М используется модификация протокола ModBus – ModBus RTU (Remote Terminal Unit – удаленный терминал). Обмен осуществляется по принципу запрос-ответ. Ведущее устройство отправляет запрос ведомым устройствам, и то устройство, для кого это сообщение, отправляет ответ.

Формат передаваемого сообщения состоит из следующих разделов:

- адрес ведомого устройства – назначенный адрес ведомому устройству;

- код функции – чтение регистра хранения, чтение нескольких регистров хранения, пользовательские функции и др.;
- данные – параметры функции;
- блок обнаружения ошибок – контрольная сумма проверки корректности сообщения.

#### **2.4.2. Модули блока преобразования физических сигналов**

Модули, входящие в состав блока преобразования физических сигналов, выполняют функцию преобразования сигналов из цифровой формы в физическую и наоборот [16].

Существуют разные конфигурации и исполнения АСУ ТП горнодобывающей промышленности. С целью унификации тестовых сигналов имитационного программно-аппаратного комплекса был выполнен обзор датчиков, применяемых при автоматизации технологического оборудования и процессов систем конвейерного транспорта и водоотлива [249–252].

Для контроля функционирования ленточных конвейеров применяются датчики: кабель-тросовый выключатель (датчик экстренной остановки), датчик схода ленты, датчик заштыбовки (переполнение места пересыпа), датчик скорости (контроль скорости ленты и барабанов), датчик контроля натяжения ленты, датчик контроля ограждений, датчик давления пороговый, реле положения коммутационного аппарата, датчики положения тормозов, реле включения тормозов, реле источника питания и др.

Контроль функционирования агрегатов водоотливной системы осуществляют с помощью датчиков: давления, температуры, вибрации, уровня жидкости, и др.

На основе обзора датчиков и АСУ ТП рассматриваемых систем [246,247,253–255] сформулированы требования к модельным аналогам сигналов датчиков и управляющих воздействий имитационного программно-аппаратного комплекса.

Ниже приведен перечень основных видов тестовых сигналов и их параметры:

- Дискретный вход – 5, 12 В; 0,1 А;

- Дискретный выход - 60 В; 3 А; 5 Гц;
- Аналоговый вход – 0-20/4-20 мА (не более 12,6 В);
- Аналоговый вход - 0÷2,5 В; 0,4÷2,0 В; 2 ÷ -2В;
- Аналоговый вход - 1 Гц ÷ 200 Гц. (5, 12 В; не более 0,1 А);
- Аналоговый вход – 10÷160 Ом, 10÷1400 Ом, 10÷1000 кОм (12 В; 0,3 А);
- Интерфейсы – RS-485, Ethernet.

Данный набор сигналов может быть сформирован стандартными модулями ввода/вывода Advantech серии ADAM-4000 (с поддержкой протокола Modbus) совместно с дополнительными специализированными модулями:

- Модулей формирования дискретных выходных и входных сигналов;
- Модулей формирования токовых выходов;
- Специализированный модуль формирования резистивных сигналов (диапазоны 10÷160 Ом, 10÷1400 Ом);
- Специализированный модуль частотных сигналов (1-200 Гц).

В качестве основной элементной базы блока преобразования физических сигналов выбраны модули фирмы Advantech серии ADAM-4000 [256]:

- ADAM-4056S - модуль дискретного ввода, 16 каналов;
- ADAM-4051 - Модуль дискретного вывода, 12 каналов;
- ADAM-4024 Модуль аналогового вывода, 4 канала.

Связь с такими модулями обеспечивается по интерфейсу RS-485 и используется строковый протокол ADAM-ASCII. Данный протокол описан в спецификации на модули серии ADAM-4000. Реализация протокола выполнена автором.

Для реализации специализированных сигналов – частотного и резистивного разработаны собственные модули, формирующие частотные и резистивные сигналы. Ядром таких модулей является вычислительный блок на базе микроконтроллера фирмы Atmel (конструктор Arduino [257]), передающий управляющие сигналы исполнительному блоку, непосредственно формирующему физический сигнал с заданными параметрами.



**Модуль формирования резистивных сигналов** реализован на базе набора реле и управляется логическими сигналами от вычислительного блока. Выходной сигнал обеспечивает коммутацию линии с частотой от 0 до 60 Гц.

**Модуль формирования частотных сигналов** реализован на базе набора резисторов из заданных диапазонов (10 Ом, 100 Ом, 1 кОм, 10 кОм, 100 кОм). Переключения номиналов резисторов в линии обеспечивается с помощью набора реле, которые управляются от логическими сигналами от вычислительного блока.

В работе [19] рассмотрена возможность унификации комплекса с использованием технологии OPC [115].

### **2.4.3. Блок дублирования сигналов датчиков**

Блок дублирования сигналов датчиков выполняет функцию размножения физических сигналов, поступающих от блока преобразования физических сигналов.

Дискретные сигналы дублируются по средством управления набором реле по схеме открытый коллектор.

Аналоговые сигналы формируются следующим образом:

- частотные сигналы – аналогично дискретным сигналом, за исключением того, что на вход реле подается частотный сигнал;
- токовые сигналы – последовательным подключением приемников, с учетом общей нагрузки канала до допустимого уровня.

Разработан проект модуля дублирования резистивных сигналов, который состоит из измерительной цепи, вычислительной схемы и релейной цепи. Измерительная цепь модуля преобразует резистивный сигнал, поступающий из блока преобразования физических сигналов, в цифровой. Релейная цепь модуля под управлением вычислительной схемы осуществляет коммутацию наборов резисторов в выходных каналах.

### **2.4.4. Программное обеспечение комплекса**

В состав разработанного программного обеспечения для MTSS входят следующие модули: интерпретации командного файла, менеджера связи (реализующего протоколы ModBus, ADAM-ASCII и строковый протоколы), таблиц

сигналов, сравнения управляющих воздействий, эмуляции модулей ввода/вывода АСУ ТП, модуль настройки подключений сигналов контроллера, библиотека МТО (описание библиотеки приведено в Главе 2)[5–7].

### Модуль интерпретации командного файла

Для обеспечения автоматического исполнения команд управления МТО реализована интерпретация командного файла, который представляет набор инструкций, описывающий сценарий эксперимента. Инструкция для МТО является строка текста в формате, который изображен на рисунке 36. Для разделения полей инструкции используется разделительный символ.

ID	Команда			TIME
	NAME	COM	OP	

ID – идентификатор;

NAME – наименование ЭМ;

COM – название команды;

OP – оператор, если необходим;

TIME – время исполнения команды от начала имитации в миллисекундах.

Рисунок 36. Формат инструкции для МТО

Для примера приведем управляющую команду «Пуск» для МТО «Конвейер»:  
1|Conveyor1|Start|0.

Реализация в функции исполнения инструкций для МТО позволяет менять состояние сигналов датчиков и управляющих команд на каждом шаге моделирования.

### Менеджер связи

Менеджер связи предназначен для обеспечения взаимодействия по соответствующим протоколам между МТО и прикладным программным обеспечением АСУ ТП, либо модулями блока преобразования физических сигналов, которые в свою очередь связаны физически с входами и/или выходами тестируемого оборудования.

В процессе выполнения тестирования менеджер связи преобразует моделируемые сигналы, управляющие воздействия и команды управления МТО в

соответствующие физические или информационные аналоги и осуществляет их передачу в АСУ ТП.

Преобразование моделируемых сигналов датчиков и управляющих воздействий в физические сигналы и обратно осуществляется посредством модулей блока преобразования физических сигналов. Передача информации между этими модулями происходит с использованием протоколов: ADAM ASCII для модулей Advantech [256], строковым для специализированных модулей.

Формат строкового протокола – строка вида «[Частота1Частота2]», передача аналогового сигнала реализована по выделенному последовательному порту ввода/вывода рабочей станции модели.

В основу реализации менеджера связи положены открытые библиотеки gtx [258] (связь по последовательному порту) и Jamod [259] (реализация функций протокола ModBus). Каждый канал передачи данных функционирует параллельно с основной программой как отдельный поток. Настройка менеджера связи в MTSS реализована в виде МТО «Канал связи».

### **Таблица сигналов**

Для среды MTSS и с использованием классов менеджера связи разработана встроенная база данных - таблица сигналов. Она содержит в себе текущие значения сигналов датчиков, управляющих воздействий и команд управления для каждой МТО, которая может выступать в роли объекта процесса отладки и тестирования. Процессы модулей, обрабатывающие внешние для ЭВМ данные, протекают параллельно с вычислением состояния имитационной модели.

Реализован конфигурационный файл для организации взаимодействия с контроллерами АСУ ТП по протоколу ModBus.

### **Модуль настройки подключений сигналов**

Модуль настройки подключений сигналов контроллера АСУ ТП позволяет настроить команды управления, управляющие воздействия и сигналы датчиков для выбранной МТО. Данный набор сигналов привязывает к указанным входам и выходам модулей блока преобразования физических сигналов. Для имитации

некорректных воздействий введены соответствующие опции для настройки сигналов, позволяющие игнорировать алгоритм функционирования МТО. На рисунке 37 Приведен пример настройки конфигурации сигналов контроллера АСКУ ТО М.

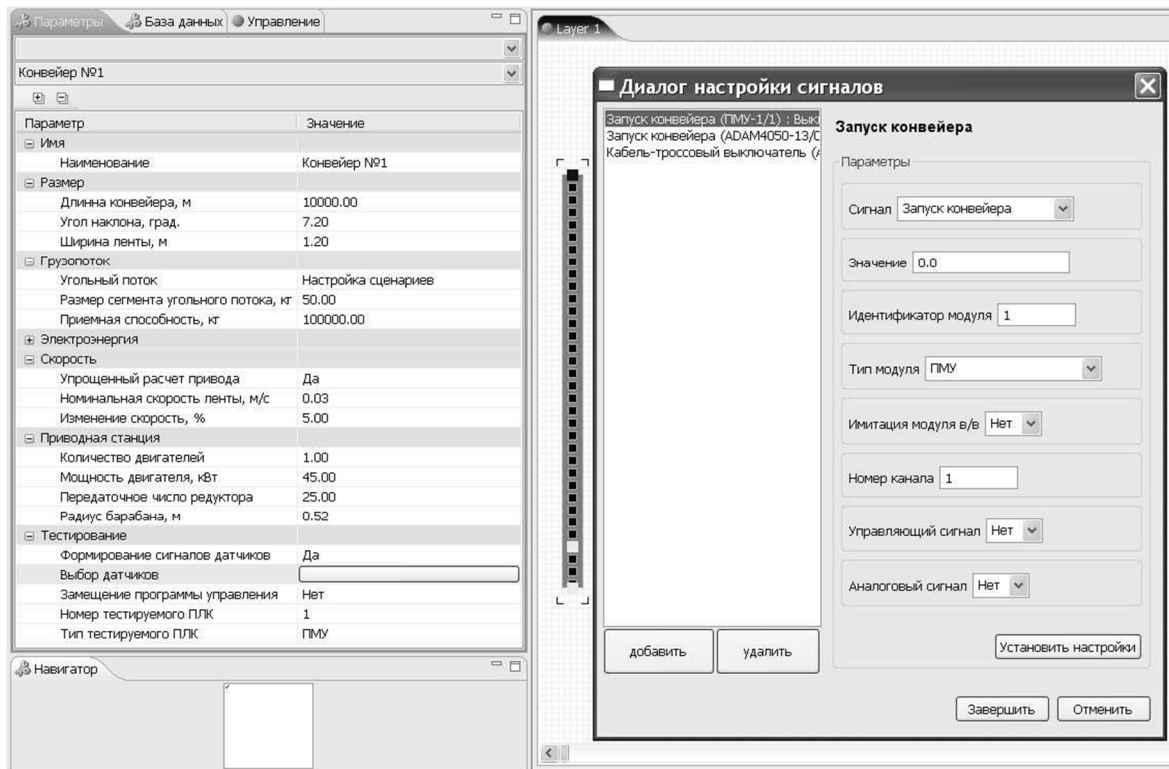


Рисунок 37. Демонстрация диалога конфигурации сигналов

### Модуль сравнения управляющих воздействий

Модуль реализует функцию сравнения управляющих воздействий, формируемых прикладным программным обеспечением АСУ ТП и их моделями. Для применения этой функции необходимо задать свойства МТО: программа управления модели является реальной или виртуальной; модель является эталоном или тестовым компонентом.

Отправка команд управления верхнего уровня в МТО, выбранные в качестве эталонной и тестируемых моделей, осуществляется за время одного шага имитационной модели системы. После получения команд управления прикладное программное обеспечение в МТО и/или в контроллерах АСУ ТП на следующем шаге моделирования формирует соответствующие управляющие воздействия на основе текущего состояния сигналов датчиков ТО. Далее осуществляется

сравнение сгенерированных управляющих воздействий от модели и/или контроллеров АСУ ТП. При идентичных сигналах эксперимент продолжается. В случае обнаружения различия между сигналами эталонной и тестируемыми МТО выполняется запись в файл соответствующих данных. Эксперимент может быть прекращен или продолжен, в зависимости от настроек в среде моделирования.

### **Эмуляция модулей ввода/вывода АСУ ТП**

Модуль эмуляции реализует передачу данных сигналов датчиков и управляющих воздействий минуя блок преобразования физических сигналов по информационному каналу комплекса. Модель встраивается в информационную линию связи АСУ ТП в виде модуля ввода/вывода. Модуль эмуляции реализует опрос карты регистров протокола ModBus в соответствии с структурой адресного пространства АСУ ТП. Настройка регистров протокола осуществляется во внешнем файле.

### **2.5. Методика тестирования алгоритмов управления**

Проверки при создании АСУ ТП делятся на несколько этапов, соответствующих стадиям проектирования АСУ ТП [260]: контроль проектных данных, отладка прототипов программно-аппаратных средств на уровне разработчика, первичное тестирование (крупномасштабное), приемочное тестирование (проверка серийного образца перед выпуском продукции), пуско-наладочные работы, опытно-промышленная эксплуатация. Стадии создания АСУ ТП - проектирование, разработка, отладка и тестирование включают в себя создание модели функционирования системы автоматизации и модели технологического процесса, выполнение отладки и первичных тестов опытных образцов оборудования.

Контроль проектных данных - это проверка перед началом разработки прототипа на соответствие описания программно-аппаратных средств требованиям задачи – достаточна ли функциональность для выполнения задач автоматизации, корректно ли заданы параметры сигналов, корректно ли сформулированы требования для выполнения первичного и приемочного тестирований, и др.

Отладка прототипов программно-аппаратных средств на уровне разработчика осуществляется с помощью локальных тестов, нацеленных на проверку корректности алгоритма управления.

Первичное тестирование (крупномасштабное) осуществляется в соответствии с разработанной программой и методикой испытаний. Выявленные ошибки или недочеты устраняются и проводится повторное испытание.

Программа и методика испытаний разработана в соответствии с требованиями нормативных стандартов [261] и учетом условий эксплуатации АСУ ТП [23,231]. Созданный документ регламентирует содержание тестовых испытаний и содержит следующие основные пункты:

1. Общесистемное тестирование, включающее проверку цепей электропитания, прохождения отдельных сигналов, исправное функционирование информационных линий, корректную работу индикации.

2. Проверка карты регистров протокола MODBUS [248], в том числе корректное отображение данных у диспетчера SCADA.

3. Контроль выполнения команд, заданных локально (с пульта контроллера) и удаленно (со SCADA или модели).

4. Контроль корректной идентификации контроллером состояний дискретных и аналоговых сигналов в каждом режиме работы, формирование соответствующих выходных управляющих сигналов и соответствующей записи состояния контроллера в карту MODBUS.

5. Проверка технологических ситуаций и достижимость состояний контроллера, включающая контроль типовых ситуаций (например, пуск и останов конвейера), контроль уставок контроллера (затянувшиеся разгон и торможение, пробуксовка, минимальная и максимальная скорости и др.), подача нештатных (например, сброс датчиков контроля двигателя и тормоза, разрешающего сигнала от предыдущего конвейера и др.) и некорректных сигналов (например, при рабочем значении скорости ленты заданы нулевые показания датчика скорости приводного барабана).

6. Проверка циклической подачей тестовых наборов сигналов в разных режимах и состояниях контроллера.

7. Тестирование интерфейса пользователя.

8. Технологический прогон (72 часа).

Приемочное тестирование направлено на контрольную проверку серийных изделий перед выпуском продукции, выявление сбоев программного обеспечения, вызванных причинами, не зависящими от разработчиков. Такие тесты, в рамках текущей работы, выполняются по сокращенной программе, содержащей пункты 1, 3, 4 и 8 разработанной методики.

По разработанной программе и методике испытаний проводилось тестирование совместимости созданной системы АСКУ ТО М и АСКУ ТО 2.

Выявленные при тестировании ошибки были классифицированы следующим образом:

– ошибки конфигурации (задан неправильный перечень сигналов; выполнена ошибочная настройка каналов ввода/вывода; установлены некорректные аварийные уровни сигналов; и др.);

– ошибки алгоритма управления (присутствуют логические нарушения в алгоритме; некорректно реализованы функции вычисления параметров; и др.);

– ошибки в пользовательском интерфейсе (некорректная инициализация значений в конфигурационной таблице; ошибочная индикация; некорректная визуализация состояния; и др.);

– ошибки подключения (ошибки функционирование подключаемых модулей; некорректная коммутация внутри контроллера; и др.);

– ошибки обмена данными (некорректное функционирование интерфейса; ошибки в формировании пакетов данных; и др.).

Результаты тестирования приведены в таблице 14. Полнота покрытия обеспечивается тестами: граничных значений классов эквивалентности для сигналов датчиков; условий алгоритма управления; переходов алгоритма управления; проверка некорректных значений сигналов датчиков и команд.

Таблица 14. Результаты тестирования АСКУ ТО М для системы конвейерного транспорта шахты

Класс ошибок	Кол-во ошибок при тестировании	Кол-во ошибок при внедрении на объекте	Процент выявленных ошибок, %
Ошибки конфигурации	8	1	87,5
Ошибки алгоритма управления	17	2	88,2
Ошибки в пользовательском интерфейсе	13	2	84,6
Ошибки подключения	5	0	100,0
Ошибки обмена данными	3	2	66,7
<b>ИТОГО</b>	<b>45</b>	<b>7</b>	<b>84,4</b>

## 2.6. Режимы функционирования стенда

Функционирование программно-аппаратного комплекса тестирования прикладного программного обеспечения возможно в следующих режимах:

– *тестовый (основной режим)* предназначен для выполнения комплексных отладки и тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП. Позволяет выполнять оценку качества алгоритмов прикладного программного обеспечения АСУ ТП, прогнозирование значений параметров технологических процессов угольной шахты, анализ последствий при действии (бездействии) диспетчера при возникновении и развитии аварийных ситуаций, прогнозирование возникновения аварийных ситуаций. Тестовый режим позволяет задавать три конфигурации, в которых управление МТО осуществляется следующим образом: моделью технологического процесса; моделью прикладного программного обеспечения; реальное прикладное программное обеспечение.

– *обучающий (дополнительный режим)* предназначен для обучения и аттестации эксплуатационного персонала угольной шахты, работников, осуществляющих тестирование прикладного программного обеспечения АСУ ТП, студентов высших учебных заведений.



## 2.7. Выводы

1. Создан имитационный программно-аппаратный комплекс тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП позволяющий дополнительно обеспечивать проверку совместимости контроллеров разных систем автоматизации, в том числе выполнять параллельное тестирование нескольких контроллеров.

2. Унификация комплекса на уровне подключения тестируемого оборудования АСУ ТП осуществляется путем подбора оптимальных параметров модулей ввода и вывода, входящих в состав блока преобразования физических сигналов.

3. Разработана методика применения комплекса, которая апробирована при выполнении договоров по созданию АСУ ТП конвейерного транспорта шахты Граммотеинская и водоотливной системы шахты Осинниковская (Приложение В, рисунки 38 и 39).

4. В рамках работ по созданию автоматизированной системы конвейерной линии выявлено более 40 ошибок и замечаний к созданному прикладному программному обеспечению АСУ ТП, 14 из которых являются критичными для безопасности шахты. Выявленные ошибки в прикладном программном обеспечении исправлены до начала пуско-наладочных работ на объекте. Это позволило повысить надежность и ускорить внедрение системы автоматизации на объекте.

5. Реализован метод верификации модели прикладного программного обеспечения, заключающийся в сравнении эталонных управляющих воздействий и тестовых. В качестве эталона может быть использована верифицированная модель прикладного программного обеспечения или контроллер ранее созданной АСУ ТП.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные научные и практические результаты работы сводятся к следующему:

1. Предложены структура и алгоритм функционирования имитационного программно-аппаратного комплекса для отладки, тестирования и сопровождения прикладного программного обеспечения при создании АСУ ТП, обеспечивающие взаимодействие имитационных моделей технологических процессов и прикладного программного обеспечения АСУ ТП.

2. Разработаны МТО систем угольной шахты: системы конвейерного транспорта и системы водоотлива. С использованием созданных МТО разработаны имитационные модели этих систем. Созданные МТО выполняют согласованную генерацию сигналов датчиков ТО, управляющих воздействий и команд управления для решения задачи обеспечения надежности прикладного программного обеспечения АСУ ТП угольных шахт.

3. Разработан модифицированный метод полунатурного моделирования «Hardware-In-The-Loop», обеспечивающий генерацию идентичных входных сигналов и команд управления для нескольких параллельно функционирующих контроллеров разных АСУ ТП.

4. Реализован имитационный программно-аппаратный комплекс, имитирующий внешнюю среду с помощью генерации сигналов ТО, управляющих воздействий и команд управления, обеспечивающий взаимодействие моделей и реального прикладного программного обеспечения, и модифицированный метод полунатурного моделирования «Hardware-In-The-Loop».

5. Разработана методика тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП с использованием созданного комплекса. В соответствии с созданной методикой выполнено комплексное тестирование прикладного программного обеспечения АСКУ ТО М производства ИВТ СО РАН для автоматизации систем конвейерного транспорта и водоотлива.

## **Перспективы развития диссертационного исследования**

Дальнейшее развитие диссертационной работы сформулированы в следующих положениях:

- встраивание кода алгоритма управления прикладного программного обеспечения АСУ ТП в имитационную модель;
- исследование надежности функционирования АСУ ТП в зависимости от временных интервалов, задержек сигналов датчиков и управляющих сигналов контроллеров;
- моделирование помех, шумов и искажений в линиях передачи сигналов и данных на физическом уровне для изучения функционирования аппаратной части АСУ ТП;
- использование диссертации в других областях промышленности.

## **Благодарности**

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.т.н. Окольнишникову В.В., а так же: к.ф.-м.н. Шакирову С.Р. за неоценимую помощь при обсуждении технических и теоретических вопросов диссертационного исследования, формулировку прикладных задач и общую поддержку, к.т.н. Рудометову С.В. за обсуждение результатов диссертации, д.т.н. Ордину А.А. за консультации в вопросах технологии угледобычи, и всем оказавшим содействие и поддержку при выполнении работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка имитационной модели шагающей крепи с интеграцией алгоритмов управления для визуализации технологических процессов / Никитенко М.С., Журавлев С.С., Малахов Ю.В., Абабков Н.В. // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2019. № 1. – С.49–58. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-1-49-58.
2. Журавлев С.С. Программно-аппаратный комплекс для тестирования программ управления АСУ ТП шахт и рудников // Вычислительные технологии, 2013. Специальный выпуск, Т. 18. – С.150–155.
3. Журавлев С. С. Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования технических систем // Проблемы информатики, 2009. № 4. – С. 47–53.
4. Журавлев С.С. Моделирование автоматизированной системы контроля и управления технологическими объектами горно-шахтного предприятия // Тезисы IX Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, 2008. Кемерово. – С.46–47.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014611165 Российская Федерация. Программный комплекс моделей типов технологического оборудования подсистемы конвейерного транспорта угольной шахты / Журавлев С.С.; заявитель и патентообладатель КТИ ИТ СО РАН. – № 2014611165 ; заявл. 28.11.13 ; опубл. 20.02.14 , Бюл. № 2. – 1 с.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018614019 Российская Федерация. Программа преобразования данных из среды имитационного моделирования MTSS в форматы протоколов АСУ ТП / Журавлев С.С.; заявитель и патентообладатель ИВТ СО РАН. – № 2018611244; заявл. 09.02.2018; опубл. 27.03.18, Бюл. № 4. – 1 с.
7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019660181 Российская Федерация. Программный комплекс моделей технологического оборудования системы водоотлива угольной шахты для среды имитационного моделирования MTSS / Журавлев С.С.; заявитель и патентообладатель ИВТ СО РАН. – № 2019619257 ; заявл.25.07.2019; опубл. 01.08.2019, Бюл. № 8. – 1 с.
8. Благодарный А.И., Гусев О.З., Журавлев С.С., Золотухин Е.П., Каратышева Л.С., Колодей В.В., Михальцов Э.Г., Чейдо, Г.П., Шакиров Р.А., Шакиров С.Р. Автоматизированная система контроля и управления ленточными конвейерами на угольных шахтах // Горная промышленность, 2008. №5(81). – С. 38–44.
9. Журавлев С.С., Окольников В.В., Рудометов С.В., Шакиров С.Р. Применение подхода «модельно-ориентированного проектирования» к созданию АСУ ТП опасных промышленных

объектов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2018. Т. 16, № 4. – С. 56–67. – DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-56-67.

10. Okolnishnikov V., Rudometov S., Zhuravlev S. Simulating the Various Subsystems of a Coal Mine // Engineering, Technology & Applied Science Research, 2016. Vol. 6, №3. – Pp. 993–999.

11. Okolnishnikov V., Rudometov S., Shakirov S. and Zhuravlev S. Using Simulation for Development of Process Control Systems in Mining // Advances in Intelligent Systems Research, 2017. Vol.134. – Pp.53–56. DOI: 10.2991/caai-17.2017.10.

12. Журавлев С.С. и др. Моделирование водоотливных и транспортных систем угольных шахт / Окольнишников В.В., Рудометов С.В., Журавлев С.С., Шакиров С.Р. // Труды Шестой азиатской международной школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», 2010. Республика Казахстан, Алматы: Изд. Института проблем информатики и управления. – С.169–176.

13. Okolnishnikov V., Rudometov S., Zhuravlev S. Simulation Environment for industrial and transportation systems // International Conference on Modelling and Simulation in Prague, 2010. Czech Republic. – Pp. 337–340.

14. Okolnishnikov V.V., Rudometov S.V., Zhuravlev S.S. Simulation of Technological Processes in Coal Mining // Preprints of the 2013 IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (IFAC MIM '2013), 2013. Saint Petersburg, Russia. – Pp.2173–2178.

15. Журавлев С.С., Иванов А.Е., Меркулов И.В., Окольнишников В.В., Рудометов С.В. Программно-аппаратный комплекс для отладки и тестирования программ управления АСУ ТП // Труды Шестой Всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу и промышленной электронике (АЭПЭ'2014), 2014. Новокузнецк: СибГИУ. – С.252–253.

16. Журавлев С.С., Окольнишников В.В., Рудометов С.В., Шакиров С.Р., Меркулов И.В. Генератор сигналов для отладки и тестирования АСУ ТП на базе имитационных моделей подсистем угольной шахты // Сборник докладов Международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2015» (АПВМ-2015), 2015. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН. – С. 260–265.

17. Okolnishnikov V., Rudometov S., Zhuravlev S.. A specialized library for simulation of coal mining in flat-lying coal seam // Proc. of the 27th the European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2015), 21–23 September 2015. Bergeggi, Italy. – Pp. 425–429.

18. Okolnishnikov V.V., Rudometov S.V., Zhuravlev S.S., Sinoviev V.V. Simulation of Longwall Coal Mining Technologies // Proceedings of the 28TH European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2016), 26 – 28 September 2016. Cyprus. – Pp. 212–215.

19. Журавлев С.С., Окольнишников В.В., Рудометов С.В., Шакиров С.Р. Унификация специализированного программно-аппаратного комплекса тестирования программ управления на примере задачи контроля качества прикладного программного обеспечения АСУ ТП шахтным

- конвейерным транспортом // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике “ВПМ’17” в рамках “Марчуковских научных чтений”, Новосибирск, 25 июня – 14 июля [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. – С. 308–313.
20. Okolnishnikov V.V., Rudometov S.V., Shakirov S.R., Zhuravlev S.S. Testing of Process Control Systems in Mining using simulation // 21st International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2017), 14-17 July 2017. Agia Pelagia Beach, Crete Island, Greece, MATEC Web of Conferences 125, 04011 (2017) CSCC 2017. – Pp.1–4. DOI: 10.1051/matecconf/201712504011.
21. Журавлев С.С., Рудометов С.В., Окольнішников В.В., Шакиров С.Р. Применение модифицированного подхода “hardware-in-the-loop” при разработке АСУ ТП конвейерной линии // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: научный журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова, 2018. № 4. – С.341–344.
22. Zhuravlev S.S., Rudometov S.V., Okolnishnikov V.V. and Shakirov S.R. Using of the modified approach “hardware-in-the-loop” while developing an process control system for belt conveyor // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. Vol. 206, No. 1, 012039. – Pp. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/206/1/012039.
23. Приказ федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 ноября 2013 года N 550 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (с изм. от 8.08.2017)».
24. Кулямин В.В. Методы верификации программного обеспечения. М.: Институт Системного Программирования РАН, 2008. – 111 с.
25. By Qianchuan Zhao, Bruce H. Krogh, Paul Hubbard. Generating Test Inputs for Embedded Control Systems // IEEE Control Systems Magazine, 2003. – Pp. 49–57.
26. Tolga Ovatman, Atakan Aral, Davut Polat, Ali Osman Ünver. An overview of model checking practices on verification of PLC software // Softw Syst Model. Springer, 2016. – Pp. 937–960.
27. Herbert E.R. Intelligent Fault Diagnosis and Control Reconfiguration // IEEE Control Systems, 1994. – Pp. 6–12.
28. James Kapinski, Jyotirmoy V. Deshmukh, Xiaoqing Jin, Hisahiro Ito, Ken Butts. Simulation-Based Approaches for Verification of Embedded Control Systems (An overview of Tradition and advanced modeling, testing, and verification techniques) // IEEE Control systems magazine, 2016. – Pp. 45–64.
29. Гури́н Р.Е., Рудаков И.В., Ребриков А.В. Методы верификации программного обеспечения // Электронный научный журнал “Инженерный вестник”, 2015. №9. – С. 549–562.
30. Савенков К., Коннов И. Верификация программ на моделях. URL: [https://lvk.cs.msu.su/~konnov/mc/2011/astana/mc\\_lect\\_01.pdf](https://lvk.cs.msu.su/~konnov/mc/2011/astana/mc_lect_01.pdf) (Дата доступа 12.12.2018).
31. Липаев В.В. Тестирование компонентов и комплексов программ. М.: СИНТЕГ, 2010. – 400 с.

32. Камкин А.С., Чупилко М.М. Обзор современных технологий имитационной верификации аппаратуры // Программирование, 2011. Т.37, №3. – С.42–49.
33. Камкин А.С. Тестирование в условиях неполной информации. Подход к разработке спецификаций и генерации тестов // Труды Института системного программирования РАН, 2006. Т.10. – С.143 – 166.
34. В.П. Иванников, А.С. Камкин, В.В. Кулямин, А.К. Петренко. Применение технологии UniTesK для функционального тестирования моделей аппаратного обеспечения.
35. Захаров А.В. Формальная верификация методом проверки модели. URL: <http://kspt.icc.spbstu.ru/media/files/2011/course/softwarequality/modelchecking.pdf> (Дата доступа 12.12.2018).
36. Евстигнеев В.А. Применение теории графов в программировании. М: “Наука”, серия “Библиотечка программиста”, 1985. – 352 с.
37. Круглов М.Г. Сотрудники кафедры СиПИ. URL: <http://misis.ru/about-university/struktura-universiteta/instituty/iibs/obschaya-informaciya/organization/sipi/kruglov> (Дата доступа 12.12.2018).
38. Царьков Д.В. Верификация распределенных программ методом проверки на модели: Дис. . . канд. физ.-мат. наук. Москва, МГУ, 2002. 185 с.
39. Сопровождение программных систем. Электронный журнал “Управляем предприятием”. 2012. №5. URL:[http://upr.ru/article/infrastruktura-it/SOPROVOZHDENIE\\_PROGRAMMNYH\\_SISTEM.html](http://upr.ru/article/infrastruktura-it/SOPROVOZHDENIE_PROGRAMMNYH_SISTEM.html) (Дата доступа 12.12.2018).
40. Куликов С.С. Тестирование программного обеспечения. Базовый курс / С. С. Куликов. — Минск: Четыре четверти, 2017. — 312 с.
41. Белоглазов Д.М., Непомнящий В.А. Моделирование и верификация взаимодействия функциональностей в телефонных сетях при помощи конечных автоматов и раскрашенных сетей Петри // Вестник новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии, 2008. Т. 6, № 3. – С. 60–71.
42. Непомнящий В.А., Ануреев И.С., Дубрановский И.В., Промский А.В. На пути к верификации С# программ: трехуровневый подход // Программирование, 2006. Т.32, №4. – С.4–20.
43. Непомнящий В.А., Аргиров В.С., Белоглазов Д.М., Быстров А.В., Четвертаков Е.А., Чурина Т.Г. Моделирование и верификация коммуникационных протоколов, представленных на языке SDL, с помощью сетей Петри высокого уровня // Программирование, 2008. Т. 34, № 6. – С.35–49.
44. Вирбицкайте И.Б., Покозий Е.А. Метод параметрической верификации поведения временных сетей Петри // Программирование, 1999. Т. 25, № 4. – С.16–29.
45. Андерсон, Р. Доказательство правильности программ / Р. Андерсон; пер. с англ. Б.Н. Зобниной, под ред. Д. Б. Подшивалова. М.: Мир, 1982. – 168 с.

46. Кузьмин Е.В., Соколов В.А., Рябухин Д.А. Построение и верификация ПЛК-программ по LTL-спецификации // Моделирование и анализ информационных систем. 2013. Т.20, №4. – С. 5–22.
47. Кузьмин Е.В., Рябухин Д.А., Соколов В.А. Моделирование согласованного поведения ПЛК-датчиков // Моделирование и анализ информационных систем. 2014. Т.21, №4. – С.75–90.
48. Кузьмин Е.В., Соколов В.А. Моделирование, спецификация и построение программ логических контроллеров // Моделирование и анализ информационных систем. 2013. Т.20, №2. – С. 104–120.
49. Программное обеспечение без ошибок / Р.Д. Бейбер ; пер. с англ., под ред. Д.И.Правикова. М.: Джон Уайли энд Санз, Радио и связь, 1996. – 176 с.
50. Тестирование черного ящика. Технологии функционального тестирования программного обеспечения и систем / Б. Бейзер ; пер. с англ. Раздо-барин А. СПб.: Издат. дом «Питер», 2004. – 318 с.
51. Майерс Г. Искусство тестирования программ / Перевод с английского под редакцией Б.А. Позина. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 176 с., ил.
52. Bringmann E., Krämer A. Model-based Testing of Automotive Systems // International Conference on Software Testing, Verification, and Validation. 2008. – Pp.485–493.
53. Erkkinen T., Conrad M. Verification, Validation, and Test with Model-Based Design. 2008. URL: [https://www.mathworks.com/tagteam/53246\\_COMVEC%2008%20-%20VVnT%20with%20MBD.pdf](https://www.mathworks.com/tagteam/53246_COMVEC%2008%20-%20VVnT%20with%20MBD.pdf) (Дата обращения: 17.03.18). DOI: 10.4271/2008-01-2709.
54. Деменков Н.П. Модельно-ориентированное проектирование систем управления // Промышленные АСУ и контроллеры, 2008. № 11. – С.66–69.
55. Ploennigs J., Folie M. Ryssel U., Ploennigs J., Kabitzsch K., Folie M. Generative Design of Hardware-in-the-Loop Models // APGES'07 – Salzburg, Austria, 2007. – Pp. 4–11.
56. Ефремов А.А., Сорокин С.С., Зенков С.М. Модельно-ориентированное проектирование – международный стандарт инженерных разработок. 2018. – URL: <https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%2040-43%20Sorokin.pdf> (Дата обращения 30.07.2018).
57. Brett M., Wakefield A. Early verification and validation using model-based design. The MathWorks. 2009. – URL: <https://www.edn.com/design/integrated-circuit-design/4313371/Early-verification-and-validation-using-model-based-design> (Дата обращения: 28.07.18).
58. Object Management Group (OMG). Model Driven Architecture. 2018. – URL: <http://www.omg.org/mda/> (Дата обращения 30.07.2018).
59. Maibaum O. Comparison of Approaches to the Test of Control Unit Software. 2007. – URL: [http://elib.dlr.de/46744/1/ics\\_maibaum.pdf](http://elib.dlr.de/46744/1/ics_maibaum.pdf) (дата обращения: 18.09.14).



60. Firesmith D. Using V Models for Testing. Carnegie Mellon University Software Engineering Institute. URL: [https://insights.sei.cmu.edu/sei\\_blog/2013/11/using-v-models-for-testing.html](https://insights.sei.cmu.edu/sei_blog/2013/11/using-v-models-for-testing.html) (Дата доступа 30.07.2018).
61. Ranville S., Black P. Automated Testing Requirements – Automotive Perspective. The Second Int. Workshop on Automated Program Analysis, Testing and Verification, 2001. – URL: <http://hissa.nist.gov/~black/Papers/autoTestReqsWAPATV.rtf> (Дата доступа 30.07.2018).
62. Использование модельно-ориентированного проектирования для разработки родстера от Tesla. – URL: <https://matlab.ru/success-story/tesla> (Дата доступа 01.08.2018).
63. Festo использует Модельно-Ориентированное Проектирование в разработке инновационных манипуляторов. – URL: <https://matlab.ru/success-story/festo> (Дата доступа 01.08.2018).
64. Бартенев В., Бартенева А. Модельно-ориентированное проектирование генератора случайных чисел // Современная электроника, 2014. № 2. – С. 64–67.
65. Ayed M.B., Zouari L., Abid M. Software In the Loop Simulation for Robot Manipulators // Engineering, Technology & Applied Science Research, 2017. Vol. 7, №5. – Pp. 2017–2021.
66. Арыков С.Б., Судьбин А.А., Шатров В.А., Рябушкин С.А., Вильданов А.И. Моделирование канала связи командно-измерительной системы космического аппарата // Решетневские чтения, 2015. Т. 2, № 19. – С.203–205.
67. Щербина Ю.В. Модельно-ориентированное проектирование системы автоматического управления температурой с циркуляцией промежуточного теплоносителя // Cloud of science, 2015. Т. 2, № 4. – С.562–576.
68. Полющенко И.С. Разработка системы управления электропривода на основе метода модельно-ориентированного программирования // Вестник МЭИ, 2016. № 6 – С.87–95.
69. Holtkötter J., Michael J., Henke C., Trächtler A., Bockholt M., Möhlenkamp A., Katter M. Rapid-Control-Prototyping as part of Model-Based Development of Heat Pump Dryers // Procedia Manufacturing. 4th International Conference on System-Integrated Intelligence: Intelligent, Flexible and Connected Systems in Products and Production, 2018. Vol. 24. – Pp.235–242.
70. Chung D.T., Rosdiazli I., Vijanth S.A., Nordin S., Hassan S.M. Internal model control for industrial wireless plant using WirelessHART hardware-in-the-loop simulator // ISA Transactions, 2018. Vol. 75. – Pp.236–246.
71. Брак И.В., Сазонова Ю.И. Разработка сервиса задания сценариев предъявления стимулов с использованием модельно-ориентированного подхода // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2018. Т.16, № 2. – С.31–40.
72. WinMOD system platform. Hennigsdorf: Mewes & Partner GmbH, 1995. URL: <http://winmod.com> (Дата доступа 12.12.2018).

73. MiMiC simulation software. Chesterfield, MYNAH Technologies, LLC, 2011. URL: <http://www.mynah.com/products/mimic> (Дата доступа 12.12.2018).
74. APROS. VTT Technical Research Centre of Finland, Fortum Power Solutions. URL: <http://www.apros.fi/en/> (Дата доступа 12.12.2018).
75. xPC Target. Natick, MathWorks, 2013. URL: <http://www.mathworks.com/products/xpctarget/> (Дата доступа 12.12.2018).
76. National Instruments. URL: <http://www.ni.com> (Дата доступа 12.12.2018).
77. Siemens SIMIT: Симуляция и виртуальный ввод в эксплуатацию. URL: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/simit.html> (Дата доступа 1.02.2019).
78. ТРОПА. URL: <https://www.krug2000.ru/products/ppr/trenajer-operativnogo-personala.html> (Дата доступа 1.02.2019).
79. РИТМ. URL: <https://exponenta.ru/products/kpm-ritm> (Дата доступа 1.02.2019).
80. Справочная система SimInTech. URL: <http://help.simintech.ru> (Дата доступа 1.09.2019).
81. Ивушкин А.А. Основы создания и внедрения систем автоматизации управления объектами угольной отрасли: Дис. . . . докт. техн. наук. Новокузнецк, ФГБОУ ВПО “СибГИУ”, 2007. 312 с.
82. Лях Т.В., Зюбин В.Е., Гаранина Т.В. Автоматизированная верификация алгоритмов управления сложными технологическими объектами на программных имитаторах // Вестник НГУ Серия: Информационные технологии, 2018. Т.16, № 4. – С.85–94.
83. Северов А., Ушаков В., Герман. Г., Тетерин Д. Автоматизированный стенд для испытания систем управления ракетно-космических стартовых комплексов // СТА. 2013. №1. –С.70–73.
84. Окольнишников В.В. Использование имитационного стенда при разработке систем автоматизированного управления // Проблемы информатики, 2008. №1. – С.75–79.
85. Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Зельцер С.Р., Венгер К.Г., Чичиндаев М.Г. Применение физических моделей в схемах натурно-математического моделирования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2010. №11. – С.65–67.
86. Островляничик В.Ю., Кубарев В.А. Представление системы технологической автоматики и защит методами теории графов // Материалы всероссийской конференции (с международным участием) “Системы автоматизации в образовании, науке и производстве”, 2014. – С.80–87.
87. Золотухин Ю.Н. Автоматизация и жизнь // История науки и техники. 2017. №5. – С.88–93.
88. Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Филиппов М.Н. Архитектура комплекса полунатурного моделирования систем управления летательными аппаратами // Автометрия, 2017. Т.53, №4. – С.44–50.
89. Золотухин Ю.Н., Белоконь С.А., Васильев В.В., Филиппов М.Н., Ян А.П. Автоматизированная система диспетчерского управления движением поездов новосибирского

- метрополитена: направление развития // Вычислительные технологии, 2013. Т18, №1. – С.156–162.
90. Зюбин В.Е. Язык РЕФЛЕКС. Математическая модель алгоритмов управления // Датчики и системы, 2006. №5. – С.24–30.
91. Зюбин В.Е. Процесс-ориентированная технология программирования: модели, языки и инструментальные средства для спецификации алгоритмов управления сложными техническими системами: Дис. ... док. техн. наук. Новосибирск, ИАиЭ, 2013. 299 с.
92. Зюбин В.Е. Итерационная разработка управляющих алгоритмов на основе имитационного моделирования объекта управления // Автоматизация в промышленности, 2010. №11. – С.43–48.
93. Зюбин В.Е. Использование виртуальных объектов для обучения программированию информационно-управляющих систем // Информационные технологии, 2009. №6. – С.79–82.
94. Лях Т.В., Зюбин В.Е. Автоматическая верификация алгоритмов управления сложными технологическими объектами на программных имитаторах // Сборник материалов международной научной конференции, посвященной памяти Р.Л. Долганова. Новосибирск, 2017. – С.128–130.
95. Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Вогоровский Р.В. Автоматизация испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата // Автоматизация. Современные технологии, 2017. Т. 71, № 4. –С.184–188.
96. Захарченко В.Е. Имитационная модель гидроагрегата для АСУ ТП // Автоматизация в промышленности, 2007. № 7. – С. 37–40.
97. Бабаян Р.Р., Осипов А.Б. Стенд для отладки ПО бортовой авиационной аппаратуры // Автоматизация в промышленности, 2013. № 5. – С.55–56.
98. Айзатулин А.И. Разработка программного обеспечения для создания, отладки и тестирования моделей цифровых СКУ АЭС нового поколения на основе проектных данных // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика ядерных реакторов, 2007. №1. – С.69–75.
99. Айзатулин А.И. Средства моделирования и проектирования алгоритмов АСУ ТП энергоблока АЭС и система визуализации и управления для моделирующих программных комплексов: Автореферат . . . канд. техн. наук. Москва, ОАО ВНИИАЭС, 2006. 22 с.
100. Бабенко А.Г., Виндекер А.В. Разработка инженерного стенда для комплексной всережимной отладки и тестирования систем автоматизации // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2010. №8. – С.118–123.
101. Маслов А.А., Висков А.Ю. Аппаратно-программный комплекс для отладки программного обеспечения АСУ ТП. URL:[http://www.mstu.edu.ru/science/conferences/11ntk/materials/section19/section19\\_18.html](http://www.mstu.edu.ru/science/conferences/11ntk/materials/section19/section19_18.html) (Дата доступа 12.12.2018).

102. Маслов А.А. Комплексная компьютеризация профессиональной подготовки инженеров-электромехаников // Вестник Мурманского государственного технического университета, 1998. Т.1, №1. – С.33–38.
103. Маслов А.А., Висков А.Ю. Комплекс для разработки и отладки проектов АСУ ТП // СТА. 2001. №3. – С.68–76.
104. Негода В.Н., Фолунин В.А. Автоматизация тестирования временных прототипов программ логического управления // Автоматизация процессов управления, 2017. №2(48). – С.41–48.
105. Бурдяло А.Л., Громаков Е.И. Автоматизация диагностики неисправностей в системах управления с оператором // Международный научно-исследовательский журнал, 2014. №6-1(25). – С.32–34.
106. Зебзеев А.Г., Журавлев Д.В., Громаков Е.И., Пушкарев М.А. Разработка и тестирование автоматизированных систем управления процессами добычи и подготовки нефти на основе временных автоматов // ЭКСПОЗИЦИЯ НЕФТЬ ГАЗ, 2012. №5(23). – С.117–119.
107. Зебзеев А.Г., Журавлев Д.В., Громаков Е.И. Применение автоматных моделей для тестирования автоматизированных систем управления // IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», 2012. – С. 46–48.
108. Бурдяло А.Л., Громаков Е.И. Тренажер: обнаружение и выделение неисправностей // XII международная научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Молодежь и современные информационные технологии”, 12-14 ноября 2014 г. Томск. – С.363–365.
109. Sang C. Park, Chang Mok Park, Gi-Nam Wang Jongeun Kwak, Sungjoo Yeo. PLCStudio: Simulation Based PLC code verification // Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008. – Pp.222–228.
110. Sang C. Park, Chang Mok Park, Gi-Nam Wang. A PLC programming environment based on a virtual plant // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. Vol.39, Issue 11-12. – Pp.1262–1270.
111. Ledin J.A. Hardware-in-the-Loop Simulation // Embedded Systems Programming, 1999. February. – Pp. 42–60.
112. Fennibay D., Yurdakuly A., Seny A. Introducing Hardware-in-Loop Concept to the Hardware/Software Co-design of Real-time Embedded Systems // 2010 10th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 29 June-1 July 2010. –Pp.1902–1909. DOI: 10.1109/CIT.2010.325.

113. Maibaum O. Comparison of Approaches to the Test of Control Unit Software // 12th Software & Systems Quality Conferences, 25th – 27th April 2007. Congress Center Dusseldorf, Germany. – Pp.1–4.
114. Meister O., Frietsch N., Seibold J., Trommer G.F. Software-in-the-loop simulation for small autonomous VTOL UAV with teaming capability. 2008. URL: [https://www.loran.org/proceedings/Meeting2008/Papers/MEISTER\\_10B2.pdf](https://www.loran.org/proceedings/Meeting2008/Papers/MEISTER_10B2.pdf) (Дата доступа 12.12.2018).
115. Швецов Д. Новые технологии работы с данными OPC // СТА. 2007. № 1. – С. 66–69.
116. Рыжиков Ю. И., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Проблемы теории и практики имитационного моделирования // Материалы всероссийской конференции ИММОД-2007. Санкт-Петербург, 2007. – С. 58–70.
117. Имитационное моделирование. Классика CS. / Лоу А. М., Кельтон А. Д. – 3 изд. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
118. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Шеннон Р. – М.: Мир, 1978. – 421 с.
119. Моделирование сложных систем / Бусленко Н. П. – М.: Наука, 1968. – 356 с.
120. Бигдан В.Б., Гусев В.В., Марьянович Т.П., Сахнюк М.А. Становление и развитие имитационного моделирования в Украине. URL: <http://www.icfst.kiev.ua/MUSEUM/TXT/Bigdan.pdf> (Дата доступа 12.12.2018).
121. Трошин Ю.В. Совершенствование управления и механизмов принятия решений в инфокоммуникационной компании на основе имитационного моделирования: Автореферат . . . канд. техн. наук. Уфа, ФГБОУ ВПО ПГУТИ, 2010. 17 с.
122. Конюх В.Л., Игнатъев Я.Б., Зиновьев В.В. Развитие средств имитационного моделирования // Сб. докл. II Всерос. науч.-практ. конф. “Имитационное моделирование. Теория и практика” (ИММОД-2005), 2005. Т.1. Санкт-Петербург. – С.122–126.
123. Elliott M. Buyer’s guide simulation // IEE Solutions. – 2000. № 5. – Pp. 55–64.
124. Имитационное моделирование систем. URL: <http://www.gpss.ru/> (Дата доступа 12.12.2018).
125. Борщев А.В. Применение имитационного моделирования в России - состояние на 2007 г. // Сб. докл. III Всерос. науч.-практ. конф. “Имитационное моделирование. Теория и практика” (ИММОД-2007), 2007. Т.1. Санкт-Петербург. – С.11–16.
126. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование теория и технологии. СПб.:Альтекс. 2004. – 529 с.
127. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // Exponenta PRO, 2004. № 3/4. – С.38–47.
128. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / ФОРРЕСТЕР Д.; Под ред. Гвишиани П. р. Д. М. – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.

129. Schruben L. Simulation Modeling with Event Graphs // *Communications of the ACM*, 1983. №26. – Pp.957–963.
130. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование – М.: Наука, 1982 – 296 с.
131. Чернов А.В., Гуда А.Н., Чубейко С.В., Бутакова М.А. Оценка надежности программного обеспечения методами дискретно-событийного моделирования // *Программные продукты и системы*, 2015, №4. – С.158–165.
132. Конюх В.Л., Игнатъев Я.Б., Зиновьев В.В. Методы имитационного моделирования систем. Применение программных продуктов. Электронное изд. зарег. в Федеральном депозитарии электронных изданий, № 0320401123. Рег. свид. ФГУП НТЦ «Информрегистр» от 06.09.2004, № 4753.
133. Зиновьев В.В., Гречишкин П.В. Практическое применение программных средств имитационного моделирования // *Материалы Всероссийской конференции ИММОД-2007*, 2007. Санкт-Петербург. – С.78–82.
134. Swain J. J. Discrete event simulation software: New frontiers in simulation // *OR/MS Today*, 2007. Vol.34, Issue 5. – Pp.32–43.
135. Сравнение Rockwell Automation Arena с другими инструментами моделирования. URL:<http://www.interface.ru/home.asp?artId=20152> (Дата доступа 12.12.2018).
136. Mejia G., Martinez D., Torres F. Modeling and development of an Arena interface for Petri nets. A case study in a Colombian cosmetics company // *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 2008. – Pp.1368–1375.
137. Vapat V., Sturrock D.T. The Arena product family: enterprise modeling solutions // *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000. – Pp.163–169.
138. Arena, Rockwell Software. URL: <http://www.arenasimulation.com/> (Дата доступа 12.12.2018).
139. Обзор продуктов семейства Arena. URL: [http://team.furia.ru/fast\\_new\\_233\\_team.html](http://team.furia.ru/fast_new_233_team.html) (Дата доступа 12.12.2018).
140. Krahl D. ExtendSim 7 // *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 2008. – Pp.215–221.
141. Krahl D. Extend: An interactive simulation tool // *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, 2003. – Pp. 188–196.
142. Imagine That, Inc. URL:<http://www.extendsim.com> (Дата доступа 12.12.2018).
143. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Карпов Ю. Г. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 400 с.
144. XJ Technologies. URL: <http://www.xjtek.ru> (Дата доступа 12.12.2018).
145. Rohrer M.W. Maximizing simulation ROI with AutoMod // *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, 2003. – Pp.201–209.

146. Lebaron T., Jacobsen C. The simulation power of AutoMod // WSC '07 Proceedings of the 39th conference on Winter simulation, 2007. – Pp.210–218.
147. Applied Materials Inc. URL: <http://www.automod.com/> (Дата доступа 12.12.2018).
148. Harrell C.R. Simulation modeling using Promodel technology // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002. – Pp.192–198.
149. Promodel Corporation. URL: <http://www.promodel.com> (Дата доступа 12.12.2018).
150. PTC Corporate Headquarters. URL: <http://www.ptc.com/product/mathcad/> (Дата доступа 12.12.2018).
151. MathWorks. URL: <http://www.mathworks.com> (Дата доступа 12.12.2018).
152. MINEFRAME (ГИ КНЦ СО РАН). URL: <http://www.mineframe.ru> (Дата доступа 12.12.2018).
153. Рудометов С.В. Визуально-интерактивная система имитационного моделирования технологических систем // Вестник СибГУТИ, 2011. №3. – С.14–27.
154. Рудометов С.В. Визуально-интерактивная система имитационного моделирования технологических систем: Автореферат . . . канд. техн. наук. Новосибирск, КТИ ВТ СО РАН, 2011. 16 с.
155. Rist K. The solution of a transportation problem by use of a Monte Carlo technique // Proc. of the 1st Intern. symp. on computer application in mining (APCOM-I). Tucson Univ. of Arizona, 1961. L2.1–L2.15.
156. Hewlett R., Redmon D.E. Design and Applications of Some Mathematical Models for Mine-System Analysis / Hewlett R., Redmon D.E.: USB or Mines RI 6158, 1963. – 51 p.
157. Harvey P.R. Analysis of Production Capabilities / APCOM C. S. o. M., pub. in Quar. of Col. School of Mines, 1964. – Pp.713–726.
158. Hatherly R.N., Ruffles B.R. Simulation of Copper Ore Handling at Mt. Isa / The AusIMM NW Queensland Branch r. M., 1974. – Pp.155–162.
159. Redling G. Ein Modell fur die Simulation des Grubenbetriebes unter Tags / 13th APCOM C.-Z., Germany, 1975. – Pp.Y-III 1 – Y-III 12.
160. Boghani A.B. Improving Mine Evacuation Through Computer Simulation // Mining Magazine. 1978. – Pp.354–359.
161. Macknight A., Mahoney B.K. Application of Simulation Models to Port Planning and Management // The Aus. I. M. M. Southern Queensland Branch, Computers in Mining, 1983. – Pp.275–286.
162. Mine Design: Examples Using Simulation. – Soc. of Mining Engr. (USA): Littleton, 2000. – 232 p.
163. Harrison J., Sturgul J. GPSS Computer Simulation of Equipment Requirements for the Iron Duke Mine // Secnml Large Open Pit Mining Conference, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1989. Victoria. – Pp. 133–136.

164. Sturgul J.R. How to Determine the Optimum Location of In-pit Moveable Crushers // *Intr. Jour. of Min. and Geol. Engr.*, 1987. Vol.5, Issue 2. – Pp.143–148.
165. Vagenas N. Orebody modelling for underground mine performance // *Conference: 1st International Symposium on Mine Simulation via the Internet*. December 1996. – P.69.
166. Vagenas N. Simulation of underground hard rock mining using AutoMod // *Conference: 1st International Symposium on Mine Simulation via the Internet*. December 1996. – P.17.
167. Panagiotou G.N. MODIS - A monitoring and dispatch system for the mining industry // *Conference: 1st International Symposium on Mine Simulation via the Internet*. December 1996. – P.105.
168. Panagiotou G.N. STRAPAC2 - A tool for planning and analysing shovel-truck operations // *Conference: 1st International Symposium on Mine Simulation via the Internet*, December 1996. – P.7.
169. Gray G.J. Use of Animated Simulation Models in Major Capital Projects. URL: [https://www.researchgate.net/publication/266453783\\_Use\\_of\\_Animated\\_Simulation\\_Models\\_in\\_Major\\_Capital\\_Projects](https://www.researchgate.net/publication/266453783_Use_of_Animated_Simulation_Models_in_Major_Capital_Projects) (Дата доступа 5.11.2018).
170. Giacaman G.J., Medel R.P., Tabilo J.A. Simulation of the material transporting and loading process in PEDRO DE VALDIVIA mine // *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002. – Pp.1349–1355.
171. Burý A., Čech R. Simulation model development for underground mine logistic // *International Carpathian Control Conference (ICCC' 2002)*, 27-30 May 2002. Malenovice, Czech Republic. – Pp.555–560.
172. Burý A. Application of simulation models for optimization of coal blends // *Acta Montanistica Slovaca Ročník 9,2004. číslo 2*. Malenovice, Czech Republic. – Pp.106–112.
173. Кенжин Б.М. Исследование имитационной модели взаимодействия вибрационно-сейсмического модуля с угленородным массивом // *Збірник наукових праць «Проблеми гірського тиску» (ground control in mining)*, 2009. № 17. Донецк. – С.58–66.
174. Berton A., Jubinville M., Hodouin D., Prévost C.G., Navarra P. Ore storage simulation for planning a concentrator expansion // *Minerals Engineering*, 2013. Vol.40. – Pp.56–66.
175. Cuiping Li, Jiajie Li, Zhongxue Li, Dingyong Hou. Establishment of spatiotemporal dynamic model for water inrush spreading processes in underground mining operations // *Safety Science*, 2013. Vol.55. – Pp.45–52.
176. Mahdi Shabanimashcool, Charlie C.Li. Numerical modelling of longwall mining and stability analysis of the gates in a coal mine // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012. Vol.51. – Pp.24–34.
177. Marcelo Moretti Fioroni, Letícia Cristina Alves dos Santos, Luiz Augusto G. Franzese, Isac Reis Santana, Gustavo Dezem Telles, Josiane Cordeiro Seixas, Bruno Penna, Gerson Mendes de Alkmim.



Logistic evaluation of an underground mine using simulation // Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. – Pp.1855–1865.

178.Oriol Falivene, Lluís Cabrera, Alberto Sáez. Forecasting coal resources and reserves in heterogeneous coal zones using 3D facies models (As Pontes Basin, NW Spain) // International Journal of Coal Geology, 2014. Vol.130. – Pp.8–26.

179.Andrzej Walentek, Tomasz Janoszek, Stanisław Prusek, Aleksander Wrana. Influence of longwall gateroad convergence on the process of mine ventilation network-model tests // International Journal of Mining Science and Technology, 2019. Vol.29, Issue 4. – Pp. 585–590.

180.Lalatendu M., Prasanta K.J., Devi P.M. Wireless sensor network based fire monitoring in underground coal mines: A fuzzy logic approach // Process Safety and Environmental Protection, 2018. Vol. 113. – Pp.435–447.

181.Liang Yuntao, Zhang Jian, Ren Ting, Wang Zhongwei, Song Shuanglin. Application of ventilation simulation to spontaneous combustion control in underground coal mine: A case study from Bulianta colliery // International Journal of Mining Science and Technology, 2018. Vol.28, Issue 2. – Pp. 231–242.

182.Qin Johnny, Qu Qingdong, Guo Hua. CFD simulations for longwall gas drainage design optimization // International Journal of Mining Science and Technology, 2017. Vol.27, Issue 5. – Pp.777–782.

183.Franco-Sepulveda Giovanni, Campuzano Carlos, Pineda Cindy. NPV risk simulation of an open pit gold mine project under the O’Hara cost model by using GAs // International Journal of Mining Science and Technology, 2017. Vol.27, Issue 3. – Pp.557–565.

184.Li Yang, Zhu Enguang, Zhang Kangning, Li Minghao, Wang Jiaying, Li Chengkun. Longwall mining under gateroads and gobs of abandoned small mine // International Journal of Mining Science and Technology, 2017. Vol.27, Issue 1. – Pp.145–152.

185.Yong Zhao, Tianhong Yang, Penghai Zhang, Jingren Zhou, Qinglei Yu, Wenxue Deng. The analysis of rock damage process based on the microseismic monitoring and numerical simulations // Tunnelling and Underground Space Technology, 2017. Vol.69. – Pp.1–17.

186.Шевченко В.Г. Имитационное моделирование технологических процессов шахты // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений : Тезисы докладов международной студ. научно-технической конференции кафедры “Строительство шахт и подземных сооружений” ДонНТУ, 2003. – С.42–43.

187.Мещанинов С.К., Король В.И. Имитационная система промышленной безопасности угольных шахт (ИСПБУШ) // Науковий вісник Н Г У, 2010. № 1. Дніпропетровськ. – С.19–22.

188. Рухлов А. В. Моделирование графиков электрической нагрузки водоотливной установки угольных шахт. URL: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/73/6.pdf> (Дата доступа 12.12.2018).
189. Рухлов А. В., Козарь А. В. Выбор критерия оптимизации работы конвейерного транспорта шахт в аспекте энергосбережения. URL: <http://www.masters.donntu.org/2011/fkita/makarov/library/article6.htm> (Дата доступа 12.12.2018).
190. Рухлов А. В., Козарь А. В. Особенности применения накопительных угольных бункеров в транспортной системе шахт. URL: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/78/18.pdf> (Дата доступа 12.12.2018).
191. Ткачев В.В., Проценко С.Н. Управление грузопотоками на конвейерном транспорте. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/upravlenie-gruzopotokami-na-konveyernom-transporte> (Дата доступа 12.12.2018).
192. Ткаченко А.М., Стрельцова Г.А. Имитационное моделирование забойного комплекса поточной выемки крепких руд на основе компьютерных объектно-ориентированных технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 8. – С.190–191.
193. Бондаренко В.И., Русских В.В., Медяник В.Ю. Опыт применения программного обеспечения воздухораспределения в угольных шахтах Украины. URL: [https://scibook.net/ekologicheskaya-geologiya\\_1331/opyt-primeneniya-programmnogo-obespecheniya-50398.html](https://scibook.net/ekologicheskaya-geologiya_1331/opyt-primeneniya-programmnogo-obespecheniya-50398.html) (Дата доступа 12.12.2018).
194. Круковская В. В., Круковский А. П., Виноградов Ю. А. Исследование влияния длины шпуров при буровзрывном способе проходки на протекание газодинамических процессов в забое выработки // Науковий вісник НГУ, 2010. №3 – С.14–20.
195. Шабает О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Принципы интеллектуализации рабочих процессов мехатронной горной выемочной машины // ВІСТІ ДОНЕЦЬКОГО ПІРНИЧОГО ІНСТИТУТУ, 2010. № 1. – С.68–78.
196. Головнева Е.Е. Постановка задачи по разработке методики комплексной оценки и прогноза экологических последствий массового закрытия шахт в Донбассе // Горное дело, 2004. ДонНТУ – С. 144–148.
197. Губка Ю.А., Оголобченко А.С. Исследование способа управления автоматизированным ступенчатым водоотливом с учетом периодов максимальных нагрузок в системе электроснабжения шахты // Наукові праці донецького національного технічного університету. Серія: обчислювальна техніка та автоматизація, 2012. №23 (201). – С.14–20.
198. Казимир В.В., Серая А.А. Модели верификации планов ликвидации аварий на угольных шахтах // Математичні машини і системи, 2012. №1. – С.129–138.

- 199.Разумный Ю.Т., Заика В.Т., Прокуда В.Н. Формирование характеристик потока угля конвейерного транспорта по данным моделирования грузопотоков из очистных забоев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: електротехніка і енергетика, 2013. № 2(15). – С.201–206.
- 200.Садовенко И. А., Инкин А. В., Рудаков Д. В., Хрипливец Ю. В. Моделирование процесса затопления шахты № 2 «Новгородовская» с учетом дальнейшего использования ее теплового ресурса // Известия Уральского государственного горного университета, 2014. № 1(33). – С.29–37.
- 201.Конюх, В.Л. Имитатор NETSTAR / В.Л. Конюх, Михайлишин А.Ю., В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617178 от 27.10.2010 г.
- 202.Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ. / Конюх В.Л., Зиновьев В.В. – Н.: Изд-во СО РАН, 2011. – 243 с.
- 203.Конюх В.Л., Зиновьев В.В. Имитационное моделирование в горном деле // Труды Первой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2003), 2003. Санкт-Петербург. – С.106–110.
- 204.Гречишкин П.В. Динамическое моделирование технико-организационных вариантов работы очистного забоя // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2008. № 7. – С.271–277.
- 205.Kapitanov V.A., Ponomarev Y.N., Tailakov O.V. Methods and apparatus for coal mine methane emissions monitoring // Alabama, 2006. Paper 0627. – 5 P.
- 206.Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем / Конюх В.Л., Тайлаков О.В. – Н.: Наука. Сиб. отд., 1991. – 182 с.
- 207.Голодов М. А. Обоснование параметров короткозабойных технологий отработки околоствольных целиков с закладкой выработанных пространств: Дис. ... канд.техн.наук. Новочеркасск, Шахтинском институте (филиал ЮРГПУ(НПИ)), 2009. 227 с.
- 208.Бахвалов Л. А., Шпильчевский О. В. Бахвалов Л. А., Шпильчевский О. В. Системное моделирование угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень, 1999. №4. – С.36–41.
- 209.Агафонов В. В. Разработка научно-методического обеспечения формирования стратегии устойчивого развития горнотехнических систем угольных шахт: Дис. ... докт.техн.наук. Москва, ФГБОУ ВПО МГГУ. 2009. 330с.
- 210.Варламова С.А., Володина Ю.И., Затонский А.В., Язев П.А. Разработка имитационной модели для планирования горно-выемочных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. №10. – С.214–222.

211. Такайшвили Л.Н. Концепция реализации информационной системы «Перспектива развития угольной промышленности страны» // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2011. №4(51). – С.16–23.
212. Оганесян А.С. Проблемы компьютерного анализа сложных горных выработок на основе имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2003. № 5. – С.30–31.
213. Шек В.М., Соболева М.Ю. Использование имитационного моделирования для оптимизации проведения горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2005. №10. – С.201–205.
214. Шек В.М., Пасечник И.А. Моделирование обрушения горных пород в очистных забоях угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2010. №5. – С.363–368.
215. Чудинов Г.В. Архитектура системы имитационного моделирования грузопотока в калийных рудниках – ПК «РУДОПОТОК» // Вестник пермского университета, 2011. Математика. Механика. Информатика, №3(7). – С.67–73.
216. Чудинов Г.В. Опыт разработки системы имитационного моделирования грузопотока в калийных рудниках – ПК «РУДОПОТОК» // Материалы пятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2011), 2011. – С.311–315.
217. Lebedev A., Staples P. Lebedev A., Staples P. Simulation of materials handling systems in the mines: Two case studies // Simulation, 1998. Vol.70, Issue 3. – Pp.183–196.
218. Панасюк И. И. Имитационное моделирование организации рудопотока и управления затратами горнорудного предприятия: Дис. ... канд. эк. наук. Санкт-Петербург, СПбГЭУ. 2005. – 263с.
219. Зиновьев В.В., Стародубов А.Н., Николаев П.И., Кузнецов И.С. Применение имитационного моделирования для оценки вариантов отработки выемочного блока короткими забоями // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2018. №S48. – С.181–193.
220. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М., Решетняк С.Н. Резервы повышения эффективности работы выемочных участков угольных шахт // Уголь, 2019. № 3 (1116). – С.46–49.
221. Латышев О.Г., Карасев К.А., Казак О.О. Прогноз буримости горных пород на основе имитационного моделирования процесса // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2015. №4. – С.83–87.

222. Окольнішников В.В., Ордин А.А., Рудометов С.В. Имитационное моделирование работы очистного забоя угольной шахты // Сборник трудов девятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2019), 2019. – С.200–205.
223. Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Особенности функционирования выемочных участков угольных шахт высокой производительности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2017. №29. – С.19–25.
224. Белопушкин В.И., Подольская Ю.А. Основы моделирования работы карьерного железнодорожного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2005. № 6. – С.184–186.
225. Стадник Д.А. Разработка методики технологического картографирования высокопроизводительной отработки запасов выемочного участка угольной шахты: Дис. ... канд.техн.наук. Москва. ФБГОУ МГГУ, 2008. 212с.
226. Бойко Е. А. Комплексное исследование и учет реакционной способности энергитических углей в практике моделирования и совершенствования теплотехнологических процессов и оборудования: Дис. ... докт.техн.наук. Красноярск, ФГОУ ВПО СФУ. 2008. 427 с.
227. Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. Имитационное моделирование системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2016. №12. – С.40–50.
228. Лапшин А.А. Математическое моделирование кондиционирования рудничного воздуха в зоне горных работ // Записки горного института, 2014. Т.210. – С.53–62.
229. Кенжин Б.М., Журунова М.А., Саттаров С.С. Имитационное моделирование физических процессов при шахтных геофизических исследованиях // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011. №6. – С.107–111.
230. Политехнический словарь. 3 изд. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с.
231. О промышленной безопасности опасных производственных объектов // Федеральный закон №116-ФЗ от 21.07.1997 (с изм. и доп. от 07.03.2017).
232. Городниченко В.И., Дмитриев А.П. Основы горного дела. – М.: “Горная книга”, МГГУ. 2008 – 484 с. Москва, 2008.
233. Шехурдин В.К., Несмотряев В.И., Федоренко П.И. Горное дело. Учебник для техникумов. – М.: Недра. 1987. – 440с.
234. Галкин В.И., Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П., Запенин И.В., Шешко Е.Е. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. – М.: МГГУ. 2005. – 526 с.
235. Хорольский А.А. Специальные средства и схемы водоотлива. 2-е издание. – М.: Национальный Открытый Университет “ИНТУИТ”, 2016. – 93 с.

236. Втюрин В.А. Основы АСУ ТП (Учебное пособие). – Спб.: Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия имени С. М. Кирова. 2006. – 154 с.
237. Голушко С.К., Меркулов И.В., Михальцов Э.Г., Чейдо Г.П., Шакиров Р.А., Шакиров С.Р. Индустриальные информационно-управляющие системы: от проектирования и разработки до практической реализации // Вычислительные технологии, 2013. Специальный выпуск, Т. 18. – С.4–11.
238. Оценочный обзор QNX 4.25. URL: <http://www.swd.ru/print.php3?pid=855> (Дата доступа 12.12.2018).
239. Техническая документация QNX. URL: <http://www.kpda.ru/support/docs> (Дата доступа 12.12.2018).
240. Шакиров Р.А. ЖШСИ.663 Автоматизированная система контроля и управления технологическим объектом АСКУ ТО М Руководство по эксплуатации. ИВТ СО РАН. – 62 с.
241. Шакиров Р.А. ЖШСИ.660.300 ПС Блок контроля и управления. Паспорт. ИВТ СО РАН. – 7 с.
242. Law A.M. How to build valid and credible simulation models // Proc. of the Winter Simulation Conference, 7-10 December 2008. Miami. – Pp.39–47.
243. Конюх В.Л. Моделирование конвейерной транспортной сети шахты // Отчет о научно-исследовательской работе. Новосибирск: КТИ ВТ СО РАН. 2009. – 41 с.
244. Шалыто А.А. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: СПбГУ ИТМО. 1998. – 56с.
245. Журавлев С. С. и др. Разработка системы мониторинга с использованием имитационного моделирования / Андриюшкевич С. К., Журавлев С. С., Золотухин Е. П., Ковалев С. П., Окольнишников В. В., Рудометов С. В. // Проблемы информатики, 2010. № 4. – С.65–75.
246. Патент на полезную модель №100669 Российская Федерация, МПК7 H01N3/00. Пульт группового управления для работы в условиях подземной выработки угля / Гусев О.З., Иванов А.Е., Лесков С.К., Нарымский Б.В., Меркулов И.В., Шакиров Р.А.; заявитель и патентообладатель КТИ ВТ СО РАН. – №2010130020/07; заявл. 19.07.10; опубл. 20.12.10, Бюл. №35. – 1 с.
247. Патент на полезную модель №133951 Российская Федерация, МПК7 G06F 9/00, G05B 19/00. Блок контроля и управления в условиях опасного производства / О.З. Гусев, В.В. Колодей, А.С. Мамаев, Э.Г. Михальцов, С.Р. Шакиров; заявитель и патентообладатель КТИ ВТ СО РАН. – №2013126010/08; заявл. 05.06.13; опубл. 27.10.13, Бюл. №30. – 1 с.
248. Томас Дж. Введение в протокол Modbus. Часть 1 // СТА, 2009. №2. – С. 52–57.
249. Комплект датчиков “Контроль”. ООО "Опытное Производство “Технологии Контроля”, 2017. URL:<http://op-teko.ru/control/control.html> (Дата доступа 12.12.2018).

250. Конвейерная автоматика. АО НПК “ТЕКО”, 2017. URL: <http://teko-com.ru/catalog/konvejernaja-avtomatika/> (Дата доступа 12.12.2018).
251. Конвейерное оборудование. ООО “Промышленный Союз”, 2017. URL: <http://gsho-prom.ru/konvejernoje-oborudovanie.html> (Дата доступа 12.12.2018).
252. Устройства управления и связи. Прокопьевский завод взрывозащищенного оборудования «ГОРЭКС – Светотехника». URL: <http://www.gorex-ex.ru/category-items/1-produktsiya/4-ustrojstva-upravleniya-i-svyazi/> (Дата доступа 12.12.2018).
253. Блок управления конвейером. Компания ДЭП, 2017. URL: <http://dep.ru/catalog/103/buk-ks-ex/> (Дата доступа 12.12.2018).
254. Контроллер универсальный шахтный. ООО “ИНГОРТЕХ”, 2017. URL: <http://www.ingortech.ru/produktsiya/tekhnicheskie-ustrojstva/iskrobezopasnye-kontrollery/item/139-контроллер-универсальный-шахтный-куш/> (Дата доступа 12.12.2018).
255. ЦАУК. ООО «ЭНИКОМП», 2017. URL: <http://enicomp.ru/produktsiya/gorno-shahtnoe-oborudovanie/tsauk-2m/> (Дата доступа 12.12.2018).
256. ADVANTECH. URL: <https://www.advantech.ru> (Дата доступа 12.12.2018).
257. Arduino. URL: <https://www.arduino.cc> (Дата доступа 12.12.2018).
258. Библиотека RXTX. URL: [http://rxtx.qbang.org/wiki/index.php/Main\\_Page](http://rxtx.qbang.org/wiki/index.php/Main_Page) (Дата доступа 12.12.2018).
259. Библиотека Jamod. URL: <http://jamod.sourceforge.net> (Дата доступа 12.12.2018).
260. ГОСТ 34.601-90. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. Дата введения 01.01.1992.
261. ГОСТ 19.301-79. Единая система программной документации. Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению (с изм. № 1, 2). Дата введения 01.01.1981.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. Специализированные программно-аппаратные комплексы

Таблица 15. Сравнение наиболее распространенных специализированных программно-аппаратных комплексов тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП

Название	WinMod	MiMiC	xPC Target (MatLab)	LabView	Модель гидроагрегата ГЭС (на базе AnyLogic)	Имитационный программно-аппаратный комплекс	SIMIT	APROS	Полигон СибГИУ	Система тестирования АСДУ метрополитена	Стенд для испытания систем управления стартовых комплексов
Производитель	Mewes & Partner	МУНАН Technologies	MathWorks	National Instruments	ООО НВФ "Сенсоры. Модули. Системы"	ИБТ СО РАН	Siemens	VTT Technical Research Centre of Finland, Fortum Power Solutions	СибГИУ	ИАиЭ СО РАН	ОАО "КБ "Электроприбор"
Метод моделирования	Неизвестно	Динамическое	Динамическое, дискретно-событийное, смешанное	Динамическое, дискретно-событийное, смешанное	Неизвестно	Смешанное (Дискр.-соб. и агентное)	Динамическое	Динамическое	Смешанное (физическая модель совместно с имитационной)	Событийный	Неизвестно
Интерфейсы	EtherNET/IP, TCP/IP, RS-232, RS-485	EtherNET/IP, TCP/IP, RS-232, RS-485	TCP/IP, RS-232	TCP/IP	EtherNET, RS-232, RS-485	RS-232, RS-485	EtherNet, TCP/IP, RS-232, RS-485	Нет данных	Нет данных	Нет данных	RS-422 и нестандарт. интерфейсы
Протоколы	MODBUS	MODBUS	Нет данных	Нет данных	MODBUS TCP	MODBUS RTU, ADAM ASCII	MODBUS	Нет данных	Нет данных	EtherNet	Нет данных
Опер. сис.	Windows	Windows	Windows	Windows	Windows, Apple Mac OS, Linux	платформа с поддержкой Java	Windows	Нет данных	Windows	Нет данных	Нет данных



Продолжение таблицы 15

Название	WinMod	MiMiC	xPC Target (MatLab)	LabView	Модель гидроагрегата ГЭС (на базе AnyLogic)	Имитационный программно-аппаратный комплекс ИВТ СО РАН	SIMIT	APROS	Полигон СибГИУ	Система тестирования АСДУ метрополитена	Стенд для испытания систем управления стартовых комплексов
<b>Мин. системные требования</b>	2 ГГц, 1 Гб, 50 Мб	2 x 3 ГГц, 4 Гб, 80 Гб	Нет данных	Нет данных	Не указаны (рек. 2 x 3 ГГц, 2 Гб, 300 Гб).	2 ГГц, 1 Гб, 100 Мб	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Промышленный компьютер Advantech в составе стойки
<b>Имитация сигналов</b>	Необходимая	Реалистичная	Необходимая	Необходимая	Реалистичная	Необходимая	Необходимая	Реалистичная	Реалистичная	Необходимая	Нет данных
<b>Формирование физических сигналов</b>	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть
<b>Имитация ТП</b>	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет данных
<b>Переключение между моделью и АСУ</b>	Есть	Нет	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть	Нет данных	Нет	Нет	Нет
<b>Глобальное управление функциями комплекса</b>	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

Продолжение таблицы 15

Название	WinMod	MiMiC	xPC Target (MatLab)	LabView	Модель гидроагрегата ГЭС (на базе AnyLogic)	Имитационный программно-аппаратный комплекс ИВТ СО РАН	SIMIT	APROS	Полигон СибГИУ	Система тестирования АСДУ метрополитена	Стенд для испытания систем управления стартовых комплексов
Тренировка операторов	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет
Проверка совместимости АСУ ТП	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Библиотеки для областей промышленности	Верфи, лифты, сыпучие материалы, элеваторное оборудование, хим. произ-во, станки, конвейерные сис., линии сборки	Нефтегазовая промышленность и набор базовых эл-в	Набор базовых элементов, специализированные библиотеки	Набор базовых элементов, специализированные библиотеки	Гидроагрегат ГЭС	Конвейерные системы, электроснабжение, системы безопасности шахты	Набор базовых элементов, химическая промышленность	Электростанции, Производство бумаги и топлива	Комплексная натуральная модель	Метрополитен	Нет (встроенное программное обеспечение для тестирования ракетно-космических стартовых комплексов)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Среды имитационного моделирования технических систем

Таблица 16. Сравнение распространенных сред имитационного моделирования технических систем

Характеристика	MathCad	MathLab	Arena	ExtendSim	Anylogic	GPSS World	Automod	Promodel	MineFrame	MTSS
Год выпуска	1986	1982	1998	1988	1999	1993	1999	1999	2005	2011
Разработчик	PTC	The MathWorks	Rockwell Software	Imagine That, Inc.	XJ Technologies	Minuteman Software	Applied Materials Inc.	PROMODEL Corporation	КНЦ РАН и др.	ИБТ СО РАН
Визуальная разработка	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Специализированный язык	Встроенный язык	Встроенный язык	Нет	ModL	Нет (JAVA)	Встроенный язык	Встроенный язык	Встроенный язык	Нет	Нет (JAVA)
Вид библиотек	Стандартные	Стандартные	Стандартные	Стандартные	Стандартные	Стандартные	Настраиваемые шаблоны	Настраиваемые шаблоны	Настраиваемые шаблоны	Составные элементы
Создание пользовательских библиотек	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Нет	Есть	Поддержка разработки библиотек
Связь с внешними приложениями	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Анимация	Двумерная	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная	Двумерная / Трехмерная
Документирование	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Импорт	Нет	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Парадигмы ИМ:										
а) динамические системы	Есть	Есть	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет	Нет	Нет данных	Есть
б) системная динамика	Нет	Нет	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет	Нет		Нет
в) дискретно-событийное моделирование	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть		Есть
д) агентное моделирование	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет	Нет		Нет
е) смешенное моделирование	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет	Нет		Нет

Продолжение таблицы 16

Характеристика	MathCad	MathLab	Arena	ExtendSim	Anylogic	GPSS World	Automod	Promodel	MineFrame	MTSS
Иерархия	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет
Модуль оптимизации	Встроенный	Встроенный	OptQuest	Встроенный	OptQuest	Встроенный	AutoStat	SimRunner	Нет	Нет
Потоки случайных чисел	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	100 потоков	Нет данных	Неограниченное число
Стандартные теоретические распределения	Есть	Есть	12	18	29	Есть	7	20	Нет данных	Нет
Эмпирические распределения	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть		Есть
Независимые прогоны моделируемой системы	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Разработка сценариев	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть
Планирование статистических экспериментов	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть
Интерактивный отладчик	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть
Разработка интерфейса для пользователя модели	Нет	Есть	Нет	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет	Нет	Есть
Операционная система	Windows	Windows, Apple Mac OS, Linux	Windows	Windows, Apple Mac OS	Windows, Apple Mac OS, Linux	Windows	Windows	Windows	Windows	платформа с поддержкой Java
Требования к оперативной памяти (рекомендуемые)	512 Мб (1 Гб и более)	1 Гб (2 Гб и более)	256 Мб (512 Мб и более)	256 Мб (2 Гб)	1 Гб	32 Мб (32 Мб и более)	512 Мб	512 Мб (2 Гб)	256 Мб (2 Гб)	256 Мб - 1 Гб (2 Гб) в зависимости от платформы
Наличие демонстрационной версии	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты о внедрении результатов диссертационного исследования



<p>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</p>  <p>ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ <b>ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b> СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИВТ СО РАН)</p> <p>Пр-т Ак. Лаврентьева, 6, г. Новосибирск, 630090 Тел.: +7 (383) 330-6150; факс: +7 (383) 330-6342 e-mail: ict@ict.nsc.ru; http://www.ict.nsc.ru</p>	<p><b>УТВЕРЖДАЮ</b></p> <p>Директор ИВТ СО РАН</p> <p>д.ф.-м.н. <u>Сергеев</u></p> <p>« 30 » 0 2019</p> 
<p><b>АКТ</b> <b>о внедрении результатов диссертационного исследования</b></p>	
<p>Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационного исследования Журавлева Сергея Сергеевича на тему «Имитационный программно-аппаратный комплекс для тестирования АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности» были внедрены и использованы при выполнении государственных заданий, грантов и договоров, в том числе:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– разработка АСУ ТП конвейерной линии шахты Грамотеинской (2017 г.);</li> <li>– разработка АСУ ТП системы водоотлива шахты Осинниковской (2017-2018 гг.).</li> </ul> <p>В рамках выполнения договоров была выполнена разработка, отладка и проверка прикладного программного обеспечения АСКУ ТО М производства ИВТ СО РАН для систем конвейерного транспорта шахты Грамотеинской (запущена в промышленную эксплуатацию) и системы водоотлива шахты Осинниковской (запущена в промышленную эксплуатацию). Системы работают штатно, выполняют все необходимые функции, замечаний к работе оборудования не имеется.</p> <p><b>Эффект от внедрения.</b> Разработанный имитационный программно-аппаратный комплекс применен:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– для отладки и тестирования прикладного программного обеспечения контроллерного уровня АСУ ТП горнодобывающих предприятий;</li> <li>– для обучения эксплуатационного персонала угольной шахты.</li> </ul> <p>Применение комплекса автоматизированного тестирования позволило: сократить время внедрения АСУ ТП на предприятии заказчика в сравнении с ручным тестированием; повысить качество, обеспечить надежное и безотказное функционирование прикладного программного обеспечения контроллерного уровня АСУ ТП; упростить сопровождение АСУ ТП, выполнив отладку и тестирование новых версий прикладного программного обеспечения контроллерного уровня АСУ ТП в институте, исключив тем самым необходимость внеплановых командировок специалистов на промышленный объект.</p>	
<p>Зав. конструкторско-технологическим отделом ИВТ СО РАН</p>	<p><u>Шакиров</u> к.ф.-м.н. Шакиров С.Р.</p>
<p>Главный конструктор проекта конструкторско-технологического отдела ИВТ СО РАН</p>	<p><u>Колодей</u> Колодей В.В.</p>

Рисунок 38. Акт ИВТ СО РАН

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
"КБ ИНФОРМСИСТЕМ"  
(ООО «КБ ИНФОРМСИСТЕМ»)

Ул. Ак. Ржанова, 6, г. Новосибирск, 630090  
Тел.: +7 913 460 3847  
e-mail: vorotov2009@mail.ru

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ООО «КБ ИНФОРМСИСТЕМ»

 Воротов В.И.

« 07 »  2019 г.

М.П. 5408294620



### АКТ

#### о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящий акт составлен о внедрении результатов диссертационного исследования Журавлева Сергея Сергеевича на тему «Имитационный программно-аппаратный комплекс для тестирования АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности» при выполнении договора по разработке прикладного программного обеспечения диспетчерского уровня АСУ ТП системы водоотлива шахты Осинниковской (2017-2018 гг.). В рамках договора осуществлена отладка созданного прикладного программного обеспечения.

#### **Эффект от внедрения.**

Применение имитационного программно-аппаратного комплекса позволило сократить время внедрения АСУ ТП на предприятии заказчика и количество необходимых командировок программистов.

Рисунок 39. Акт ООО «КБ ИНФОРМСИСТЕМ»

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

УТВЕРЖДАЮ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР УГЛЯ  
И УГЛЕХИМИИ**  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ФИЦ УУХ СО РАН)пр-т Советский, 18, г. Кемерово, 650000  
тел.: 8 (3842) 36-34-62;  
e-mail: centr@coal.sbras.ru  
http://coal.sbras.ru/

Директор ФИЦ УУХ СО РАН, к.т.н.

Кочетков В.Н.

2019 г.

М.п.

**АКТ****о внедрении результатов диссертационного исследования**

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационного исследования, выполненные Журавлевым Сергеем Сергеевичем на тему «Имитационный программно-аппаратный комплекс для тестирования АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности», были внедрены при выполнении фундаментальных научных исследований в рамках проекта «Разработка научных основ создания мобильного места оператора автоматизированной системы управления технологическими процессами добычи полезных ископаемых подземным способом на базе совмещения технологий нейрокомпьютерного интерфейса и дополненной реальности» (грант РФФИ, Договор 18-37-00356\18 от 22.03.2018 г.).

Структура имитационной модели, предложенная Журавлевым С.С., была адаптирована для применения в среде моделирования MATLAB. Научные и практические результаты исследования позволили создать прототип имитационной модели модуля шагающей крепи ограждающего и поддерживающего типа, предназначенный для отладки и тестирования алгоритмов АСУ ТП, а также разработать структуру программно-технических средств отладочного комплекса.

**Эффект от внедрения**

Разработанные технические средства позволяют осуществить отладку алгоритмов управления модуля шагающей крепи ограждающего и поддерживающего типа с обеспечением трехмерной визуализации технологического процесса, что позволяет значительно повысить надежность алгоритмов прикладного программного обеспечения АСУ ТП модуля.

Директор Института угля ФИЦ УУХ СО РАН  
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф.

Клишин В.И.

Руководитель проекта РФФИ,  
н.с. лаборатории угольного машиноведения  
ФИЦ УУХ СО РАН, к.т.н.

Никитенко М.С.

Председатель ТК 269 «Горное дело», ведущий  
инженер лаборатории угольного машиноведения  
ФИЦ УУХ СО РАН

Малахов Ю.В.

Ученый секретарь, с.н.с. лаборатории  
моделирования горно-технических систем  
ФИЦ УУХ СО РАН, к.т.н., доц.

Стародубов А.Н.

Рисунок 40. Акт ФИЦ УУХ СО РАН