

На правах рукописи



ЖУРАВЛЕВ Сергей Сергеевич

**Имитационный программно-аппаратный комплекс для тестирования
АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук

Научный **Окольнишников Виктор Васильевич**

руководитель: доктор технических наук

Официальные **Зюбин Владимир Евгеньевич**

оппоненты: доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией киберфизических систем

Шорников Юрий Владимирович

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры Автоматизированных систем управления

Ведущая Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Защита состоится «9» февраля 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.061.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВМиМГ СО РАН, тел. (383) 330-71-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВМиМГ СО РАН, <http://icmmg.nsc.ru>.

Автореферат разослан «23» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.061.02
на базе ИВМиМГ СО РАН, д.ф.-м.н.



Сорокин Сергей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. 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 изготовителе 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.

Диссертационное исследование направлено на решение актуальной проблемы - повышения надежности АСУ ТП, обеспечивающих безопасность предприятий горнодобывающей промышленности. Диссертационное исследование 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 в ред. от 16.12.15).

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 поставлены и решены следующие научные и практические задачи.

1. Определение требований к имитационному программно-аппаратному комплексу, позволяющему создать среду функционирования контроллеров

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 и внедрение результатов диссертационного исследования.

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.

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. Окольнишниковым. Постановка прикладных задач сформулирована к.ф.-м.н. С. Р. Шакировым.

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: IX, XI, XII, XIII конференциях молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Кемерово 2008, Красноярск 2010, Новосибирск 2011, 2012); Пятая и шестая всероссийских научно-практических конференциях по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Санкт-Петербург 2011, Казань 2013); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск 2012); Всероссийской конференции «Индустриальные информационные системы» (Новосибирск 2013, 2015); Шестая всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу и промышленной электронике (Новокузнецк 2014); International Conference on Modelling and Simulation in Prague (Czech Republic, 2010); Шестой азиатской международной школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем» (Республика Казахстан, Алматы, 2010); IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering "SIBIRCON 2010" (Россия, Иркутск 2010); Российско-монгольской конференции молодых ученых по математическому моделированию, вычислительно-информационным технологиям и управлению (Россия, Иркутск – Монголия, Ханх, 2011); 3th International Conference on Applied

Informatics and Computing Theory (Barcelona, Spain 2012); Международной научной конференции «Моделирование-2012» (Украина, Киев 2012); XI международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека» (Россия, Екатеринбург 2013); IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (Россия, Санкт-Петербург, 2013); International conference on Systems, Control, Signal Processing and Informatics (Rhodes Island, Greece 2013); International conference Advanced mathematics, computations and applications (Россия, Новосибирск 2014); International conference Mathematics and Computers in Science and Industry. Mathematics and Computers in Science and Engineering Series (Bulgaria, Varna 2014); Международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2015» (Россия, Новосибирск 2015); 27th the European Modeling and Simulation Symposium (Italy, Berggeggi 2015); 14th International Conference on Applications of Computer Engineering (South Korea, Seoul 2015); 2nd International Conference on Mathematics and Computers in Science and Industry (Malta, Sliema 2015); 28TH European Modeling and Simulation Symposium (Cyprus, 2016); Международной конференции по вычислительной и прикладной математике в рамках "Марчуковских научных чтений" (Россия, Новосибирск 2017); 21st International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers. MATEC Web of Conferences (Agia Pelagia Beach, Crete Island, Greece, 2017); Международной научно-практической конференции «Уголь и майнинг России» (Россия, Новокузнецк 2018, 2019).

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 приложений. Текст диссертации содержит 40 рисунков, 16 таблиц. Объем текста составляет 135 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна, практическая значимость, достоверность результатов.

В первой главе **«Методы и средства тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП»** выполнен обзор 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.

В рамках диссертационного исследования в качестве предприятий горнодобывающей промышленности рассматриваются угольные шахты. 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. Структура АСУ ТП разделяется на три уровня: диспетчерский, контроллерный, датчиков. В рамках диссертационного исследования рассматривается прикладное программное обеспечение диспетчерского и контроллерного уровней.

Контроль надежности программного обеспечения основан на верификации алгоритмов. Теоретические основы верификации программного обеспечения сформулированы и развиваются учеными: Липаев В.В., Кулямин В.В., Захаров В.А., Евстигнеев В.А., Круглов М.Г., Царьков Д.В., Леман М.М., Куликов С.С., Непомнящий В.А., Вирбицкайте И.Б., Андерсон Р., Baber R.L., Beizer V., Myers G.J. и др.

Для формирования наборов тестовых данных в работе применен динамический метод верификации, который заключается в тестировании реальной программы и/или ее математической модели. Метод основан на использовании математических моделей технологических процессов и прикладного программного обеспечения АСУ ТП.

Математическая модель прикладного программного обеспечения АСУ ТП представляет собой совокупность алгоритмов управления технологическим оборудованием и их взаимодействия 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.

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 методом. Созданный имитационный программно-аппаратный комплекс содержит дискретно-событийные имитационные модели технологических процессов угольной шахты.

Задачу тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности можно формализовать указанным ниже способом. Алгоритм функционирования прикладного программного обеспечения описан с помощью конечного автомата вида (1):

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

где FSM – конечный автомат, описывающий функционирование прикладного программного обеспечения, S – набор состояний конечного автомата, S_0 – начальное состояние при запуске имитации, A – входной алфавит автомата (2); Y – выходной алфавит (3); g – функция переходов; F – конечные состояния.

$$A_i = \{A\text{SENSOR}_i, D\text{SENSOR}_i, \text{CONTRLCOM}_i, \text{BUTTONCOM}_i\}, \quad (2)$$

где A_i – входной алфавит на i -ом шаге, $A\text{SENSOR}_i = \{as_{i1}, \dots, as_{in}\}$ – значения сигналов аналоговых датчиков на i -ом шаге; $D\text{SENSOR}_i = \{ds_{i1}, \dots, ds_{im}\}$ – значения сигналов дискретных датчиков на i -ом шаге; $\text{CONTRLCOM}_i = \{cc_{i1}, \dots, cc_{il}\}$ – команды управления диспетчерского уровня на i -ом шаге; $\text{BUTTONCOM}_i = \{bc_{i1}, \dots, bc_{ik}\}$ – команды управления контроллерного уровня.

$$Y_i = \{OUTSIG_i, \text{REPCOM}_i\}, \quad (3)$$

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; $\text{REPCOM}_i = \{rc_{i1}, \dots, rc_{iw}\}$ – ответ на команды управления диспетчерского уровня на i -ом шаге.

Для реализации функции тестирования необходимо обеспечить 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; τ_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.

Средства тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП включают имитаторы сигналов, на основе физических моделей, имитаторы цифровых сигналов, специализированные комплексы. Существуют специализированные программно-аппаратные комплексы: WinMod, MiMiC, APROS, xPC Target, комплекс средств тестирования National Instruments, SIMIT, ТРОПА, РИТМ, SimInTech, полигон СибГИУ, комплекс виртуальных лабораторных стендов ИАиЭ СО РАН, автоматизированный стенд для испытания систем управления ракетно-космических стартовых комплексов и др. Специализированные комплексы с интегрированными математическими моделями позволяют реализовать согласованную генерацию сигналов датчиков, управляющих воздействий и команд управления, избежать недостатков присущих имитаторам сигналов и имитаторам, основанным на физических моделях.

В области создания специализированных программно-аппаратных комплексов известны работы следующих отечественных и зарубежных ученых: Окольников В.В.; Мышляева Л.П.; Ивушкина А.А.; Островляничка В.Ю.; Золотухина Ю.Н.; Зюбина В.Е.; Ноженковой Л.Ф.; Захарченко В.Е.; Бабаяна Р.Р.; Айзатулина А.И.; Бабенко А.Г.; Маслова А.А.; Негоды В.Н.; Громакова Е.И.; Sang C. Park, Wang G.N. и др.; Ledin J.A.; Ryssel U., Ploennigs J. и Kabitzsch K.; Erkinen T. и Mirko C.; Dogan Fennibay, Arda Yurdakul и Alper Sen; Olaf Maibaum; Oliver Meister, Natalie Frietsch, Justus Seibold, and Gert F. Trommer; и др.

Сформулированы требования к структуре имитационного программно-аппаратного комплекса, в который должны входить: имитационные модели технологического оборудования (МТО) рассматриваемых систем угольной шахты, алгоритмы прикладного программного обеспечения АСУ ТП, среда функционирования АСУ ТП идентичная реальной с точки зрения внешних сигналов, интерфейсный уровень.

Проведен обзор программных средств имитационного моделирования (MathCad, MathLab, Arena, ExtendSim, AnyLogic, GPSS World, Automod, Promodel,

MineFrame, MTSS и др.). Для разработки МТО и моделей технологических процессов угольной шахты применена среда имитационного моделирования MTSS, разработанная в ИВТ СО РАН.

В области имитационного моделирования технологических процессов горнодобывающих предприятий известны 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.

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 создания МТО, предназначенных для разработки, отладки и тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП. Приведен пример использования созданной библиотеки МТО.

В диссертации приведено описание способа контроля и управления ТО предприятий горнодобывающей промышленности на примере угольных шахт. Угольная шахта является опасным промышленным объектом 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. 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.

В ИВТ СО РАН разрабатываются и изготавливаются АСУ ТП для систем угольных шахт: конвейерный транспорт, система водоотлива, электросеть предприятия и др. Для систем конвейерного транспорта и водоотлива были разработаны соответствующие МТО.

Для среды моделирования MTSS была разработана усовершенствованная структура МТО, которая представлена набором множеств (5), а на рисунке 1 представлена взаимосвязь между элементами МТО (пунктирные линии – информационные, сплошные линии – управление).

$$MTO = \{SUBM, KTO, KACS, PIC, PORT, PARAM, VAR, M, COM, SIG, MS, I, STAT\}, \quad (5)$$

где *SUBM* – набор имитационных моделей составных частей ТО, 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 управления 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; *SIG* – таблица сигналов датчиков и команд управления, содержащая набор данных, представленных в выражении (6); *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* – сбор статистики о функционировании МТО.

$$SIG_i = \{COMU_i, COMD_i, SD_i, SA_i\}, \quad (6)$$

где индекс *i* – *i*-ый шаг моделирования, *SIG_i* – состояние таблицы сигналов; *COMU_i* – команды управления диспетчера; *COMD_i* – сигналы управления составными частями ТО; *SD_i* – состояние дискретных сигналов датчиков ТО; *SA_i* – состояние аналоговых сигналов датчиков ТО.

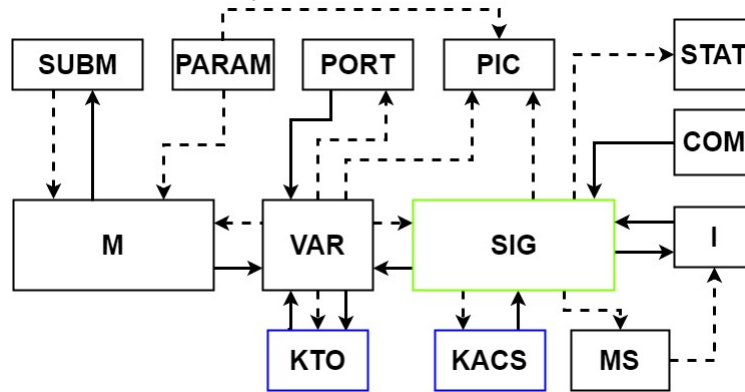


Рисунок 1 – Взаимосвязь между элементами структуры МТО

Значения сигналов датчиков формируются в процессе взаимодействия блоков конечных автоматов, описывающих алгоритмы функционирования ТО и прикладного программного обеспечения АСУ ТП, и математического описания взаимосвязей между параметрами и переменными (7). Команды управления могут быть заданы в ручном или автоматизированном режиме. Интерфейсная часть комплекса формирует пакеты данных, в соответствии с протоколами АСУ ТП.

$$f(Port_i, Var_i, Param, Com_i) \xrightarrow{M} Sig_i, \quad (7)$$

где *f* – функция генерации данных для таблицы сигналов, индекс *i* – *i*-ый шаг моделирования, *Port_i* – входные данные; *Var_i* – значения внутренних переменных; *Param* – проектные параметры ТО; *Com_i* – команды управления диспетчера и сигналы управления составными частями ТО; *Sig_i* – состояния набора данных таблицы сигналов МТО.

Генерация таблицы сигналов *Sig_i*, в том числе сигналов *Err_i* нештатных и аварийных ситуаций, выполняется посредством организованной взаимосвязи между конечными автоматами ТО и прикладного программного обеспечения АСУ ТП в соответствии с выражением (8).

$$M: A_i \times S_{KTO_i} \times S_{KACS_i} \times SUBM_i \rightarrow Sig_i, Err_i, \quad (8)$$

где индекс *i* – *i*-ый шаг моделирования, *A_i* – входной алфавит конечных автоматов *KTO* и *KACS*; *S_{KTO_i}* – текущее состояние конечного автомата *KTO* алгоритм функционирования ТО; *S_{KACS_i}* – состояние конечного автомата *KACS* алгоритм прикладного программного обеспечения АСУ ТП; *SUBM_i* – состояние набора имитационных моделей составных частей ТО; *Sig_i* – состояния набора данных таблицы сигналов МТО; *Err_i* – состояние набора сигналов нештатных или аварийных ситуаций.

Процесс разработки МТО заключается в создании концептуальной модели и ее переводе в машинное представление на универсальном языке Java в соответствии с усовершенствованной структурой представления МТО в среде имитационного моделирования MTSS. После разработки МТО выполнена верификация интегрированных алгоритмов, валидация функционирования моделей и проверка адекватности формирования физических сигналов датчиков.

В соответствии с описанной методикой разработан набор МТО систем угольной шахты конвейерного транспорта и водоотлива, содержащий

имитационные модели: забоя, бункера, конвейера, насоса, водопровода, резервуара, источника технологических и грунтовых вод, трансформатора, трансформаторной подстанции, кабеля линии электропередач. С помощью созданной библиотеки разработаны имитационные модели конвейерного транспорта и системы водоотлива. Эти МТО позволили реализовать генерацию сигналов датчиков ТО, управляющих воздействий и команд управления АСУ ТП.

Третья глава «**Имитационный программно-аппаратный комплекс для тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП**» содержит описание структуры имитационного программно-аппаратного комплекса и предложенного модифицированного метода полунатурного моделирования для проверки совместимости разных АСУ ТП. Приведена методика применения комплекса для тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП систем угольной шахты.

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

Структура имитационного программно-аппаратного комплекса состоит из аппаратной (рисунке 2) и программной частей (рисунок 3). В состав программной части входят следующие программные модули: среда имитационного моделирования MTSS, менеджер связи, имитационные модели модулей ввода/вывода АСУ ТП, имитационные модели технологических процессов, МТО, алгоритмы прикладного программного обеспечения АСУ ТП, система диспетчерского управления и сбора данных. В состав аппаратной части входят следующие функциональные модули: рабочая станция диспетчера, рабочая станция оператора имитационной модели, среда передачи данных и блок преобразования физических сигналов. Среда передачи данных реализована в виде совокупности каналов передачи данных, линий сигналов датчиков и управляющих воздействий. Передача данных осуществляется по интерфейсу RS-485. Связь контроллера со станцией диспетчера и эмуляция удаленных модулей ввода/вывода являются опциональными функциями. Блок преобразования физических сигналов формирует на основе полученных информационных сигналов соответствующие физические сигналы, а также осуществляет обратное преобразование для управляющих воздействий АСУ ТП.

Процесс тестирования в имитационном программно-аппаратном комплексе начинается с подачи команды управления в MTSS в автоматическом или ручном режимах. Затем команда управления обрабатывается в выбранной МТО и далее поступает в менеджер связи, который обеспечивает взаимодействие между имитационной моделью системы и контроллером и/или другими техническими 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.

Алгоритм комплекса состоит из блоков, осуществляющих функции: настройки комплекса и имитационной модели, имитации технологического

процесса и/или оборудования, имитации АСУ ТП, эмуляции АСУ ТП, обработки управляющих воздействий АСУ ТП.

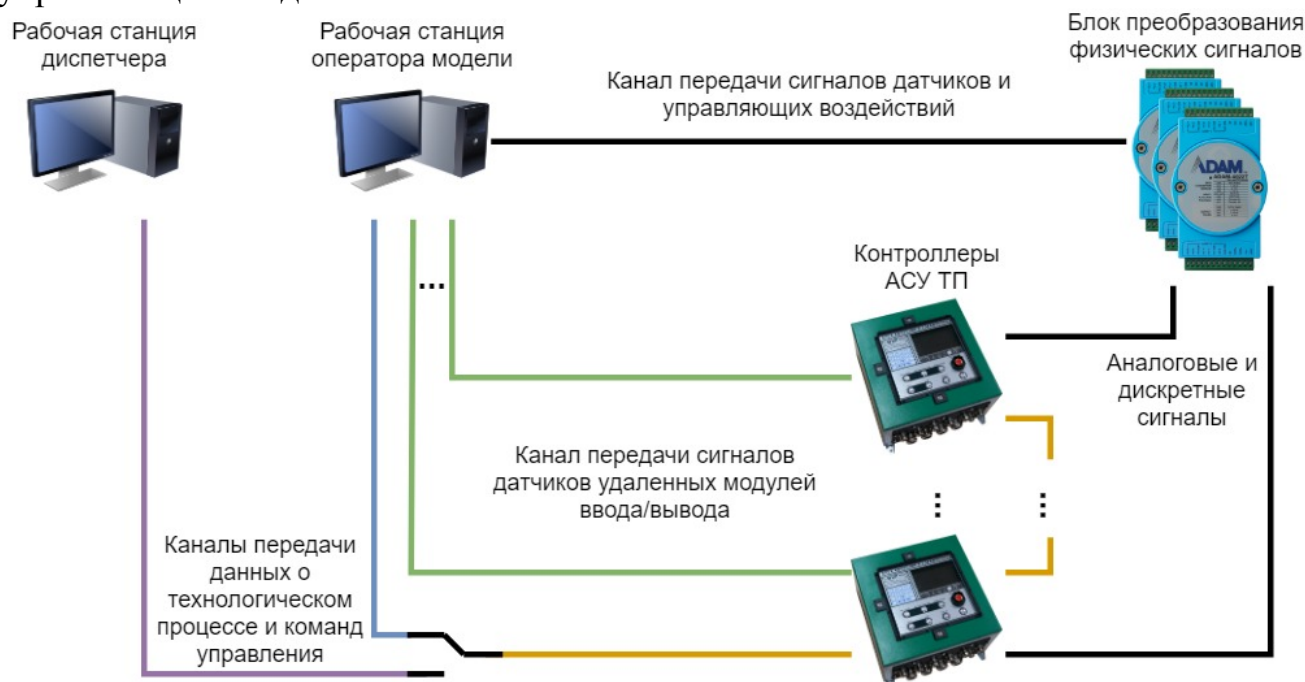


Рисунок 2. Структура имитационного программно-аппаратного комплекса



Рисунок 3. Программные модули рабочей станции оператора модели имитационного программно-аппаратного комплекса

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

Ускорение 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).

Разработана модификация метода полунатурного моделирования («Hardware-in-The-Loop») подхода «модельно-ориентированного проектирования». Способ 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 (рисунок 4). Это позволяет выполнить проверку и добиться идентичного функционирования тестируемого и эталонного контроллеров на одних и тех же

входных сигналах и командах управления. Модуль дублирования физических сигналов формирует идентичные копии дискретных и аналоговых сигналов.

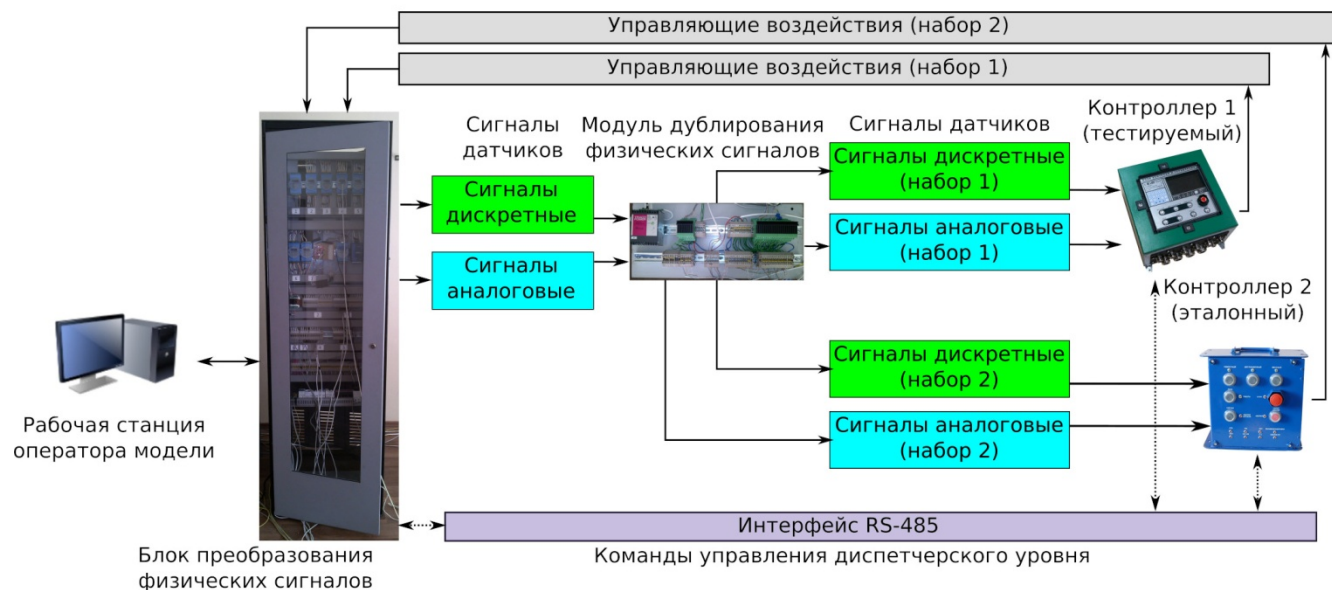


Рисунок 4 – Модифицированная структура комплекса

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

Программа и методика испытаний разработана с учетом нормативных стандартов и условий эксплуатации АСУ ТП. Созданная методика применена при проверке совместимости созданной системы АСКУ ТО М (Автоматизированная система контроля и управления технологическим объектом во взрывозащищенном исполнении) и АСКУ ТО 2 (Автоматизированная система контроля и управления технологическим оборудованием).

Результаты выявленных ошибок приведены в таблице 1. Полнота покрытия обеспечивается тестами: граничных значений классов эквивалентности для сигналов датчиков; условий алгоритма управления; переходов алгоритма управления; некорректных значений сигналов датчиков и команд.

При создании АСУ ТП конвейерной линии выявлено более 40 ошибок и замечаний к созданному прикладному программному обеспечению, 14 из которых являлись критичными для безопасности шахты. Выявленные ошибки исправлены на предприятии изготовителе до начала пуско-наладочных работ на объекте. Выполнены работы по отладке АСУ ТП водоотливной системы.

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; *обучающий (дополнительный режим)* предназначен для обучения эксплуатационного персонала угольной шахты, работников, осуществляющих тестирование

прикладного программного обеспечения АСУ ТП, студентов высших учебных заведений.

Таблица 1 – Результаты тестирования АСКУ ТО М системы конвейерного транспорта шахты

Класс ошибок	Кол-во ошибок при тестировании, шт.	Кол-во ошибок при внедрении на объекте, шт.	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
ИТОГО	45	7	84,4

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК

[1] 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. (РИНЦ).

[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. (РИНЦ).

[3] 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. (РИНЦ).

[4] Никитенко М.С., Журавлев С.С., Малахов Ю.В., Абабков Н.В. Разработка имитационной модели шагающей крепи с интеграцией алгоритмов управления для визуализации технологических процессов // Вестн. Кузбасского государственного технического университета, 2019. №1. – С.49–58. – DOI: 10.26730/1999-4125-2019-1-49-58. (РИНЦ).

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах

[5] Журавлев С. С. Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования технических систем // Проблемы информатики, 2009. № 4. – С.47–53. (РИНЦ).

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

[7] Okolnishnikov V.V., Rudometov S.V., Shakirov S.R., Zhuravlev S.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. (Web of Science).

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

[8] 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 ВТ СО РАН. – № 2014611165 ; заявл. 28.11.13 ; опубл. 20.02.14 , Бюл. № 2. – 1 С.

[9] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018614019 Российская Федерация. Программа преобразования данных из среды имитационного моделирования MTSS в формат 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.

[10] 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.

Публикации в других научных изданиях

[11] Журавлев С.С. Моделирование автоматизированной системы контроля и управления технологическими объектами горно-шахтного предприятия. // Тезисы IX Всероссийской конф. молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, 2008. Кемерово. – С.46–47.

[12] Журавлев С.С. и др. Моделирование водоотливных и транспортных систем угольных шахт / Окольников В.В., Рудометов С.В., Журавлев С.С., Шакиров С.Р. // Тр. 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. – Czech Republic, 2010. – p. 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. (SCOPUS).

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

[16] Журавлев С.С., Окольнішников 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 // Сб. докл. Международной конф. «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2015» – АПВМ-2015. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН. 2015. – С. 260–265. (РИНЦ).

[17] Okolnishnikov V.V., Rudometov S.V., Zhuravlev S.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. (SCOPUS).

[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. (SCOPUS).

[19] 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. – Pp. 1–4. DOI: 10.1051/mateconf/201712504011. (SCOPUS).

[20] Журавлев С.С., Окольнішников 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 // Тр. Международной конф. по вычислительной и прикладной математике "ВМ'17" в рамках "Марчуровских научных чтений", 2017, Новосибирск, [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. – С.308–313. (РИНЦ).

[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. Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журн. / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2018 г. – №4, С. 341-344. (РИНЦ).

[22] Zhuravlev S.S., Rudometov S.V., Okolnishnikov V.V., 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. (SCOPUS).

Подписано в печать 21.10.2020

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печ.л. 1,0.

Тираж 100. Зак. №1021

Отпечатано в типографии «Параллель»
Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1,
Тел. (383) 330-26-98