

- can individual simulator training be enabled? // Safety Science. Vol. 115. June 2019. Pages 414-424.
6. *Муравьев И.К., Маршалов Е.Д., Никоноров А.Н., Лаврентичев Д.В., Тверской Ю.С.* Технология и методология разработки полимодельных комплексов для АСУТП энергоблоков с парогазовыми установками // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. Вып. 3. С. 20-28.
  7. *Tverskoy Yu S.* Optimization of controlled processes in combined-cycle plant (new developments and researches) / Yu S Tverskoy, I K Muravev // РТРРЕ-2017. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012290 doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012290.
  8. *Целищев Е.С., Глянцева А.В.* Технология проектирования тепловых электростанций и методы ее компьютеризации. М.: Энергоатомиздат, 1997.
  9. *Тверской Ю.С., Муравьев И.К.* Новая схема автоматического регулирования мощности энергоблоков ПГУ и ее исследование при изменяющихся климатических факторах в широком диапазоне нагрузок // Новое в российской электроэнергетике. 2018. №8. С. 6-17.
  10. *Тверской Ю.С., Муравьев И.К.* Совершенствование систем регулирования подачи топлива и воздуха газотурбинных установок блоков ПГУ с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов // Автоматизация в промышленности. 2019. №1. С. 26-31.

*Тверской Юрий Семенович* – д-р техн. наук, проф.,  
*Целищев Евгений Сергеевич* – д-р техн. наук, с.н.с.,  
*Голубев Антон Владимирович* – канд. техн. наук, доцент,  
*Никоноров Андрей Николаевич* – канд. техн. наук, доцент,  
*Муравьев Игорь Константинович* – канд. техн. наук, доцент  
 ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».  
 Контактный телефон (4932) 26-97-58.  
 E-mail: kafsu@su.ispu.ru

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОТЛАДКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

**О.В. Габдулин, Р.Ф. Габитов, И.И. Исянчурин (ООО «НТЦ «ЭНЕРГОАВТОМАТИЗАЦИЯ»)**

*Представлена реализация испытательного стенда (ИС) для автоматизированных систем управления (АСУ), сочетающая возможности компьютерного тренажера и аппаратного имитатора сигналов полевого уровня. Предложен ряд решений для применения ИС на разных этапах тестирования и отладки АСУ.*

*Ключевые слова:* имитационная модель, компьютерный тренажерный комплекс, сценарий испытания, испытательный стенд АСУ,

Моделирование технологических комплексов и отдельных установок в совокупности с системами управления, де-факто ставшее стандартом обеспечения надежности и эффективности в таких отраслях, как атомная энергетика, производство газотурбинных установок, постепенно находит все большее применение в АСУ в энергетике и других отраслях. Особенно это актуально для опасных производственных объектов<sup>1</sup>. В первую очередь моделирующие программы (программные имитаторы) активно используются для компьютерного обучения операторов, однако все более доступной становится возможность внедрения данных технологий в процессы разработки и тестирования самих систем управления. Примерами таких моделирующих комплексов, охватывающих все уровни АСУ и способных работать со штатным прикладным программным обеспечением (ППО) как операторского интерфейса, так и ПЛК могут служить следующие продукты:

— программный комплекс «ЭНИКАД» [1] для создания моделирующих систем сложных технологических объектов управления (ТОУ) с предусмотренной интеграцией проекта ППО штатного атомного энергоблока в тренажер;

— компьютерный тренажерный комплекс (КТК) «Тропа» от НПФ «Круг» [2] для разработки тренажеров операторов, имеющий единый интерфейс с ПТК КРУГ-2000, обеспечивающий тем самым минимум трудозатрат при создании КТК для АСУ, создаваемых на базе ПТК данного производителя;

— КТК для энергоблоков от ЗАО «ПИК Прогресс» ([http://www.pikprogress.ru/images/publication/ВК\\_1013.pdf](http://www.pikprogress.ru/images/publication/ВК_1013.pdf)), виртуальные контроллеры которого также используют ППО контроллеров штатной АСУ.

Вместе с тем данные моделирующие комплексы не предполагают работу с АСУ на этапах испытаний, заменяя верхний уровень репликой операторского интерфейса, а нижний — виртуальными контроллерами. Тем самым они ориентированы на обучение операторов, могут применяться для проверки и отладки алгоритмов и ППО на модели ТОУ, сокращая сроки и риски пуско-наладочных работ (ПНР) на реальном объекте, но не охватывают процесс испытаний в комплексе с техническими средствами (ТС) АСУ, такими как серверное, контроллерное, кроссово-релейное, сетевое и прочее оборудование.

С другой стороны, очевидна острая необходимость использования методов моделирования в процессах

<sup>1</sup> СТО Газпром 093-2011. Компьютерные программно-вычислительные комплексы моделирования и оптимизации режимов систем добычи и трубопроводного транспорта газа. Методики оценки. Методы испытаний.

испытаний не только алгоритмов и ППО, но и ТС. Так, на этапе заводских испытаний (Factory acceptance test — FAT) соответствующие стандарты предполагают применение имитаторов для проверки прохождения сигналов<sup>2</sup>, при этом нормативы обеспечения безопасности предписывают достаточно малые периоды формирования команд управления и сигналов регулирования<sup>3</sup>. Однако стандартные методики испытаний систем управления по-прежнему опираются на использование простейших инструментов проверки и имитации сигналов, таких как мультиметры, калибраторы, осциллографы и ручные переключатели<sup>4</sup>. Такой инструментарий не позволяет реализовать полноценное испытание целого ряда функций АСУ, требующих имитации и отслеживания динамики определенного набора сигналов во времени. Таким образом, налицо явное отставание аппаратно-программного обеспечения испытаний систем управления от требований по быстродействию и надежности.

Использование моделирующих комплексов для задач испытаний наталкивается на ряд следующих проблем:

- стоимость разработки имитационных моделей зачастую сопоставима со стоимостью самой АСУ;
- высокая вычислительная емкость моделей приводит к задержкам при отработке алгоритмов и аппаратуры быстрых переключений, а также делает их громоздкими как для самого приведения модели к типовой аварийной ситуации, так и многократного повторения таких условий при испытаниях АСУ.

Поскольку разработка полноценной имитационной модели исключительно для задач испытаний является необоснованно дорогой, эффективным решением выступает применение идентичных с КТК моделей. Для этого должны быть проработаны решения по их интеграции в процесс испытаний:

- обеспечение полноценного моделирования работы АСУ с объектом на всех режимах;
- возможность автоматизированного проведения испытаний согласно соответствующим программе и методике испытаний (ПМИ) с минимизацией затрат времени на подготовку соответствующего проекта



Рис. 1. Лицевая панель ИС

ППО и на переключение комплекса между этими двумя режимами функционирования.

Благоприятными предпосылками для реализации таких решений являются возросшая доступность и простота освоения программных пакетов моделирования процессов в совокупности с уровнем производительности вычислительной техники, в частности, контроллеров и устройств ввода/вывода для лабораторного применения. Идея объединения возможностей лабораторных ПТК, обеспечивающих аппаратную связь и скоростное логическое взаимодействие с тестируемой АСУ, с системой моделирования процессов, легла в основу разработки испытательного стенда (ИС) ООО «НТЦ «ЭНЕРГОАВТОМАТИЗАЦИЯ» (рис. 1).

ИС представляет собой единое законченное изделие, включающее шкафы ИС, рабочих станций ИС, ИБП, приборов, АРМ инструктора, оператора и полевого оператора. Для повышения информативности и удобства использования шкаф ИС имеет интерактивную сенсорную лицевую панель. Данный ИС позволяет применять единую с КТК модель ТОУ как для обучения операторов, так и полноценного проведения испытаний шкафов АСУ в совокупности с ППО контроллеров и верхнего уровня. Для этого ИС, наряду с традиционными для КТК каналами связи со станциями моделирования, обучаемого и инструктора, имеет возможность аппаратного подключения для одновременной комплексной проверки испытуемых распределенных систем управления

<sup>2</sup> ГОСТ Р МЭК 62381-2016 Системы автоматизации в обрабатывающей промышленности. Заводские приемочные испытания (FAT), приемочные испытания на месте эксплуатации (SAT) и объектовые интеграционные испытания (SIT).

<sup>3</sup> СТО Газпром 2-1.17-912-2014 Системы автоматического управления объектов производственно-технологических комплексов. Системы автоматического управления и регулирования компрессорного цеха (компрессорной станции). Технические требования.

<sup>4</sup> СТО 56947007-25.040.40.160-2013 Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Типовая программа и методика заводских испытаний программно-технических комплексов автоматизированных систем управления технологическими процессами, систем сбора и передачи информации (ПТК АСУТП и ССПИ).

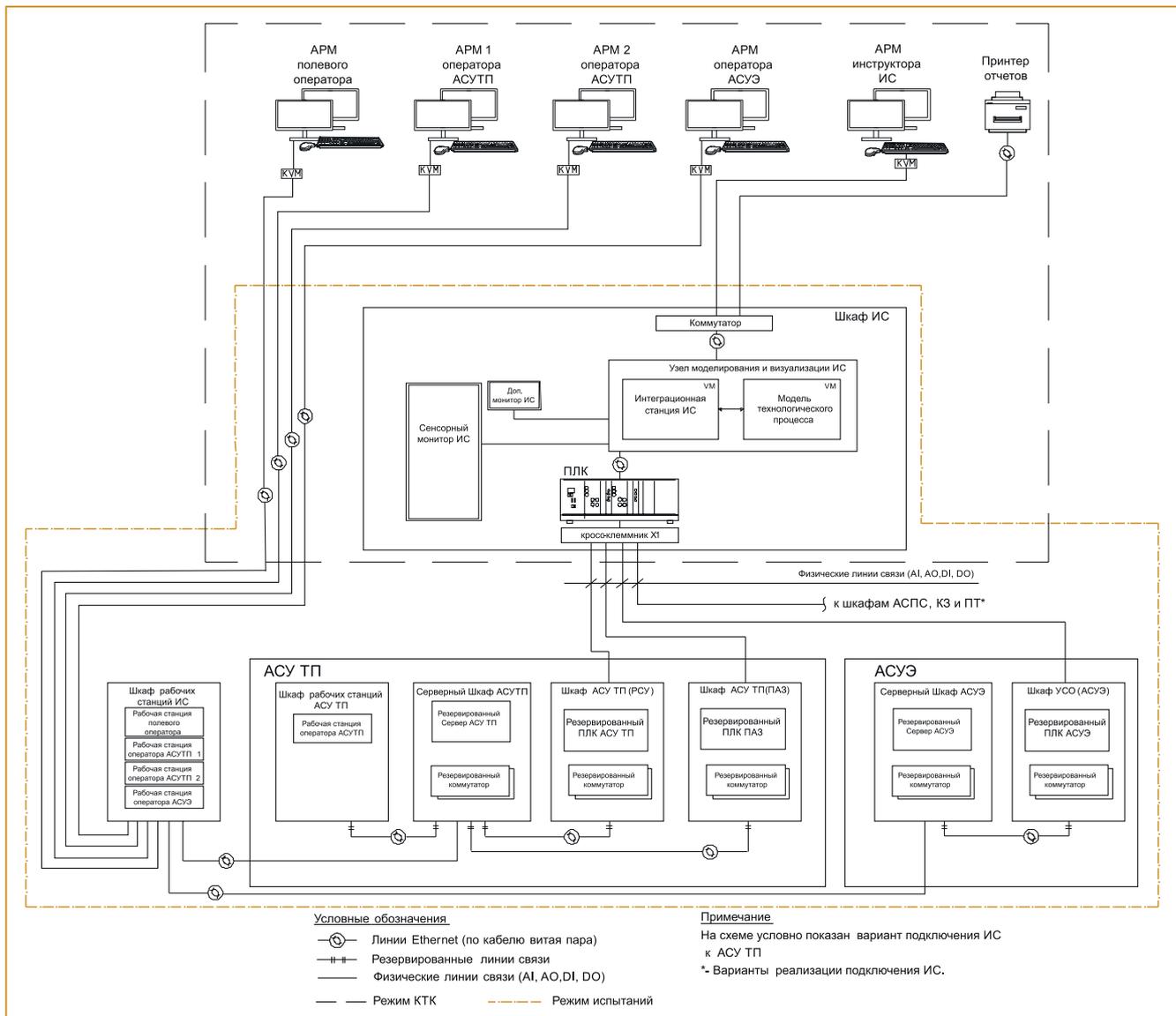


Рис. 2. Пример структурной схемы применения испытательного стенда

(PCU), систем противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ), автоматизированных систем контроля загазованности (АСКЗ), автоматизированных систем учета энергии (АСУЭ) и др. (рис. 2).

Режимом работы ИС по умолчанию является моделирование целостного ТОУ для отработки комплексных алгоритмов управления и действий операторов в различных ситуациях (режим КТК). При этом реализуются следующие функции:

- обучение навыкам безопасного управления технологическими процессами в штатных пусковых, переходных и установившихся режимах;
- обучение и приобретение практических навыков выполнения работ по предупреждению, локализации и ликвидации аварийных ситуаций;
- непрерывный и периодический контроль и тестирование уровня знаний и навыков ведения технологического процесса и локализации аварийных ситуаций;

— повышение качества подготовки рабочих и инженерно-технического персонала, занятых ведением технологического процесса и эксплуатацией оборудования, а также повышение на этой основе качества ведения технологического процесса;

— снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций по причине проявления человеческого фактора.

Для выполнения перечисленных задач используются максимально приближенные к реальным динамические модели процессов химической технологии, а также учебно-методическое обеспечение, включающее комплекс упражнений и электронно-справочную систему, обеспечивающие высокую эффективность процесса обучения, включающего следующие функции:

— ведение технологического процесса — дает персоналу предприятия знания о стадиях и режимах протекания технологического процесса;

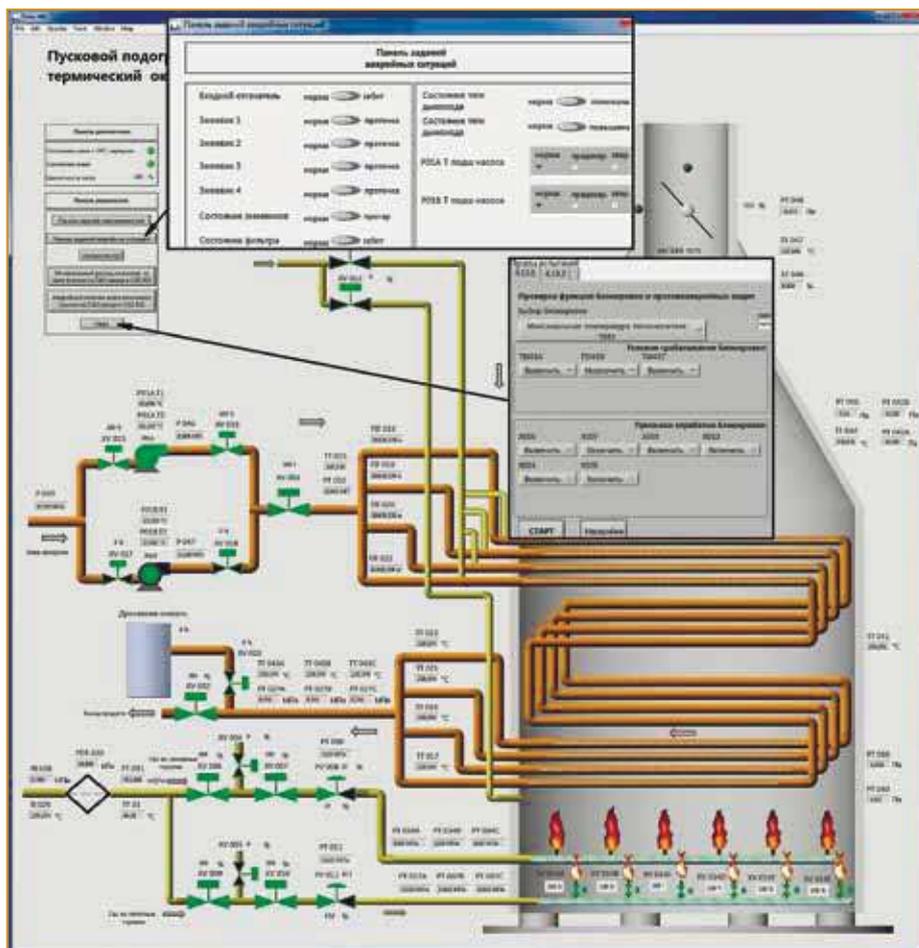


Рис. 3. Основное окно ИС с фрагментами окон задания аварийной ситуации и испытания по ПМИ

- приобретение навыков работы с АСУ;
- приобретение навыков безопасного ведения технологического процесса в штатных ситуациях;
- приобретение навыков безопасного ведения технологического процесса в нештатных и аварийных ситуациях;
- приобретение навыков безопасного выполнения операций по пуску и останову производства;
- закрепление знаний и практического опыта у оперативного и технологического персонала;
- отработка персоналом предприятия сценариев согласно плану мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий (ПМЛА);
- проведения периодической аттестации персонала предприятия.

В данном режиме модель технологического процесса выполняется на виртуальной машине (VM) моделирования или в ПЛК ИС. В первом случае используется пользовательская оболочка и исполнительная среда выбранного инструмента моделирования, а связь модели с физическим уровнем ввода/вывода осуществляется посредством интерфейсных каналов по протоколу OPC (Open Platform Communications). Во втором случае модель в виде исполняемой динамически-подключаемой библиотеки (dynamic link library — DLL) загружа-

ется в проект ИС на стадии разработки и выполняется в ПЛК ИС, а обмен по каналу связи необходим только для передачи данных для отображения на узел моделирования и визуализации ИС. В числе доступных для данной интеграции такие среды моделирования, как LabVIEW, MATLAB Simulink, MapleSim и др. В ИС реализована наиболее универсальная схема моделирования технологического комплекса, при которой имитационная модель технологических процессов выполняется на VM моделирования, а алгоритмы локальных узлов автоматики, не входящие в испытываемые АСУ, — в ПЛК ИС.

Помимо реализации функциональности КТК, режим моделирования ТОУ также применим на следующих стадиях испытаний:

- на этапе составления и уточнения алгоритмов, требующем наиболее полной имитации. В качестве примера приведена реализация моделирования протечки змеевика пускового подогревателя масла (рис. 3). Протечка вы-

бранного змеевика инициируется соответствующей командой с панели задания аварийных ситуаций, после чего можно наблюдать, насколько и в какой динамике в результате снижения количества теплоносителя меняются показатели параметров теплообменника, дымовых газов и т. д. Полученная информация позволяет оценить последствия, сформировать список и уставки параметров для идентификации аварии (условий блокировки), управляющих воздействий для минимизации последствий и безопасного останова, которые послужат основой для разработки или коррекции соответствующего алгоритма;

— на этапе комплексной проверки также применимо моделирование связанного ТОУ, когда необходимо убедиться в отсутствии непредвиденного срабатывания других алгоритмов в результате отработки ПАЗ, сформировать последовательность действий оператора, проверить и внести корректировки в систему индикации на мнемосхеме и т. д. Это позволяет уже на площадке производителя АСУ проводить аналог интеграционных испытаний (site integration test — SIT).

Режим испытаний используется на этапе проверки по ПМИ (FAT), когда подробная имитация избыточна, требуется быстрая количественная оценка работы

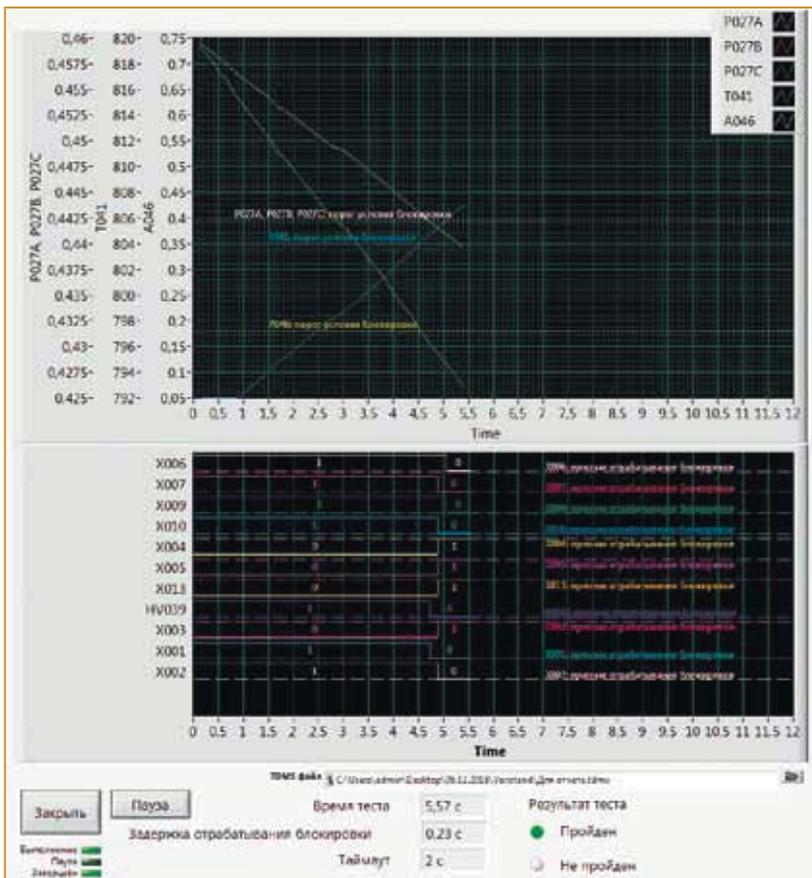


Рис. 4. Результаты проверки времени отработки ПАЗ – интервала между достижением соответствующих аварийных порогов всех входных сигналов (выходных от ИС) и моментом времени, когда все выходные сигналы (входных для ИС) проверяемого алгоритма приняли заданные значения

определенного алгоритма, например, время отработки ПАЗ, с возможностью повторного запуска проверки после внесения корректировок и быстрого перехода к другому пункту испытаний. Для этого в окне ИС

системы во внештатных ситуациях. Реализация испытаний посредством сценариев в среде ОС РВ ПЛК решает следующие задачи:

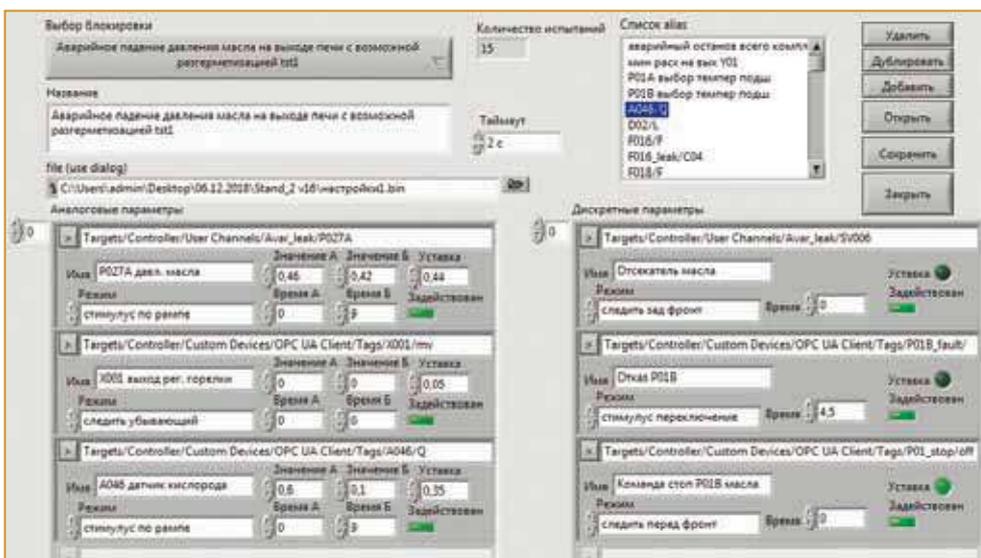


Рис. 5. Пример окна настройки сценария проверки блокировки

достаточно нажать кнопку «ПМИ», выбрать конкретное испытание, соответствующими кнопками осуществить старт (рис. 4) или настройку (рис. 5) сценария проверки. В данном режиме происходит динамическое переключение соответствующих физических каналов от модели технологического процесса на быстродействующие сценарии испытания, работающие непосредственно в ПЛК ИС, в качестве которого используется высокопроизводительная связка лабораторного контроллера и шасси ввода/вывода. Такие контроллеры работают под управлением ОС РВ, имеют высокоскоростные интерфейсы ввода/вывода физических параметров, что позволяет, например, с высокой точностью оценить количественные показатели быстродействия отработки ПАЗ от появления аварийных признаков на клеммах ввода от датчиков до результирующих сигналов воздействия на ИМ, недостижимые для типовых ПЛК общего назначения. Такие характеристики позволяют выполнять замеры времени отклика систем нижнего уровня с точностью 0,01 с (рис. 4), а также проверку функций приема и обработки аналоговых сигналов.

Подобные автоматизированные тесты существенно сокращают сроки проведения ПМИ, охватывая полную цепь прохождения сигналов и воспроизводя тем самым условия работы АСУ на реальном объекте, что особенно важно для проверки действия

— выполнение испытания становится независимым от временных задержек, вносимых продолжительностью цикла вычислительно-емкой модели, интерфейсом и процедурами обмена со станцией моделирования. Это касается также упомянутых выше DLL моделей, выполняющихся в среде ПЛК ИС;

— в результате испытания не происходит перехода модели в состояние аварии или ошибки, благодаря чему отпадает необходимость в перезагрузке последней в предыдущее

состояние либо трудоемкий возврат на штатный режим, то есть ИС готов к повторению испытания или переходу на следующее испытание сразу же после получения результатов либо прерывания предыдущего;

— возможно проведение испытаний при полном отсутствии модели, что актуально для АСУ малыми объектами, автономного тестирования отдельных компонентов АСУ. Это позволяет существенно сократить затраты на подготовку испытаний. В данном варианте работы имитация реального объекта строится на базе совокупности сценариев, создание которых максимально упрощено благодаря разработанному пользовательскому инструментарию, включенному в единый интерфейс интеграционной станции (рис. 5).

В селекторах выбора режима параметров тестирования используется понятие “стимул” (stimulus), подразумевающее активное воздействие сценария на данный сигнал<sup>5</sup> с целью имитации условий срабатывания защиты, проверки контура регулирования и т. п. Данные воздействия являются приоритетными, обеспечивая упомянутое выше динамическое переключение при выполнении теста. Такое решение избавляет от необходимости явного задания логических ключей выбора источников имитации сигнала, что положительно сказывается на скорости подготовки проекта ИС к конкретным испытаниям.

В окне настройки также доступно создание нового сценария, работа с файлами разных наборов сценариев. Таким образом, сценарии испытаний максимально вынесены за пределы проекта ППО ИС и гибко конфигурируются в режиме выполнения, что позволяет эффективно разделить обязанности между инженером и оператором ИС. После старта значения сигналов на уровне ПЛК и операторного интерфейса меняются согласно сценарию проверки, но модель процесса остается в штатном режиме. Это избавляет от необходимости возврата на режим в случае, если алгоритм защиты не сработал; перезапуск испытания доступен сразу же после оперативной правки и горячей загрузки изменений ППО ПЛК испытываемой АСУ.

Приведенная реализация ИС опробована на испытаниях образца АСУ пускового подогревателя масла (шкафы, АРМ и ППО РСУ, ПАЗ, АСУЭ) с применением модели печи подогрева как многосвязного объекта. Информационная емкость и объем физических подключений данных подсистем выбраны достаточными для проверки режимов КТК и испытаний различных аспектов функционирования

АСУ подогревателя как опасного производственного объекта:

— присутствие алгоритмов РСУ как непрерывного действия (многосвязные контуры регулирования), так и управляющих последовательностей с организацией взаимодействия между ними и между РСУ и ПАЗ в разных режимах работы подогревателя («холодный» и «горячий» пуск оборудования, нормальный режим, штатный и аварийный останов);

— влияние мажоритарных схем датчиков с двойным и тройным резервированием на алгоритмы обработки сигналов и защиты;

— учет параметров энергопотребления как дополнительных критериев безаварийной работы для алгоритмов защиты и соответствующее взаимодействие между ПАЗ и АСУЭ;

— наличие физических подключений, характерных для взрывозащищенного оборудования, а именно, сигналы типа NAMUR — интерфейса постоянного тока для бесконтактных датчиков, допустимых к применению во взрывоопасных зонах; барьеры искрозащиты аналоговых сигналов. Отработаны особенности подключения таких сигналов к физическим каналам ИС, а также влияние соответствующего оборудования на скорость обработки защит;

— реализация требований по информационному взаимодействию с центром по гражданской обороне и чрезвычайным ситуациям, с диспетчерским уровнем и АСУ смежной установки.

В результате внедрения данных решений моделирование объекта производится в режимах, максимально соответствующих контексту поставленных задач, которые существенно различаются на разных этапах испытаний, что позволяет эффективно применять имитационные модели объектов управления как для тренинга операторов, так и для отработки алгоритмов управления и защиты, а также для автоматизированного проведения заводских испытаний АСУ.

#### Список литературы

1. *Аркадов Г.В., Тимохин Е.С., Выговский С.Б., Королев С.А., Краюшкин Ю.В., Чернаков В.А.* Опыт разработки и использования тренажеров для ПНР, обучения персонала и поддержки эксплуатации на примере 3-го блока Калининской АЭС. <http://www.eniko.ru>
2. *Прошин А.И., Шехтман М.Б.* КТК "ТРОПА" - универсальное средство разработки тренажеров для операторов технологических установок // Автоматизированные информационно-управляющие системы в энергетике. 2018. №6.

*Габдулин Олег Вилерович — руководитель, Габитов Руслан Фаритович — ведущий инженер-разработчик, Исянчурин Ильнур Ильдарович — инженер 1 категории отдела разработок инновационных решений ООО «НТЦ «ЭНЕРГОАВТОМАТИЗАЦИЯ».*

*Контактный телефон +7 (347) 286-16-84, доб.5134, 5888.  
E-mail: r.gabitov@ntcea.ru i.isyanchurin@ntcea.ru o.gabdulin@ntcea.ru*

<sup>5</sup> Creating Real-Time Stimulus Profiles in NI VeriStand. (<http://www.ni.com>).