

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ
ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ



ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

В современном мире разработчикам релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем все чаще требуются средства для ускорения и оптимизации процессов разработки и тестирования своих устройств. Возникают вопросы необходимости быстрого прототипирования алгоритмов работы устройств и их отладки, а также оперативного испытания уже готовых изделий перед прохождением сертификаций в соответствующих организациях.

Одним из решений этих вопросов является разработка и испытание устройств с помощью комплексов полунатурного моделирования на базе машин реального времени и специальных программных комплексах математического моделирования физических процессов. Так разработчик может создавать прототипы устройств и тестировать их на цифровых двойниках электроэнергетических объектов с помощью машин реального времени в рамках концепции по разработке и созданию стендов полунатурного моделирования (Hardware-In-the-Loop — HIL) и стендов быстрого прототипирования (Model-In-the-Loop — MIL). При этом не нужно подключать наше устройство к реальной сети и ждать в ней аварий, которые опасны для оборудования, вместо этого используется детальная модель энергосистемы. Эффективность методов разработки в этой статье будет показано через применение отечественного комплекса полунатурного моделирования «РИТМ». Главная задача — имитационное моделирование электроэнергетических объектов для исследования и разработки систем противоаварийной автоматики и релейной защиты.



ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

В статье будут рассмотрены вопросы сертификационных испытаний устройств противоаварийной автоматики и имитационной модели защищаемого объекта электроэнергетики. Противоаварийная автоматика в электроэнергетических системах — это комплекс автоматических устройств, обеспечивающий измерение и обработку параметров электроэнергетического режима, передачу информации, команд управления, предназначенных для выявления, ограничения развития и прекращения аварийных режимов в энергосистемах с классом напряжения от единиц и сотен киловольт (6–750 кВ). Энергосистема — сложная система непрерывной генерации, передачи и потребления электроэнергии со сложными электромеханическими и электромагнитными процессами. Большинство аварийных процессов протекают очень быстро от десятков микросекунд до нескольких секунд. При такой скорости развития аварий только автоматические устройства могут остановить их развитие и минимизировать последствия. А последствия аварий могут быть самыми тяжелыми: от порчи оборудования до массовых блекаутов.

Существует множество видов противоаварийной автоматики, которая применяется в различных ситуациях и режимах. Для проведения сертификационных испытаний была выбрана автоматика ограничения перегрузки оборудования (АОПО). АОПО не допускает излишней перегрузки оборудования по току, которая может вызвать порчу оборудования из-за термического воздействия токов большой величины.

На сегодняшний день современная противоаварийная автоматика реализована на микропроцессорной элементной базе, так называемые терминалы. На реальных объектах электроэнергетики (электрические подстанции и станции) терминалы противоаварийной автоматики компонуются в специальные шкафы, к которым прокладываются цепи связи и измерения с объекта. Противоаварийная автоматика — это сложное техническое устройство, которое выполняет важные функции для поддержания работы энергосистемы, поэтому к ним предъявляются особые требования на всех этапах жизни устройства от разработки и тестирования до эксплуатации.

Перед выпуском своего устройства противоаварийной автоматики и поставкой его на объекты электроэнергетики необходимо пройти сертификационные испытания и получить все необходимые сертификаты, что является непростой задачей для разработчика. Испытания проводят с помощью специальных комплексов, которые моделируют участок энергосистемы с последующим запуском таких моделей на машинах реального времени, которые по цепям измерения (медные провода или Ethernet) передают на устройство значение токов и напряжений. С точки зрения устройства противоаварийной автоматики подключение к такому комплексу не будет отличаться от подключения к реальной энергосистеме, то есть речь идет о цифровом двойнике реального объекта для испытания устройств. В ходе испытаний на комплексе моделируются аварийные ситуации в электроэнергетической системе и отслеживается правильность работы устройства противоаварийной автоматики в той или иной ситуации. Для облегчения прохождения таких испытаний, а также упрощения процесса разработки, необходимы соответствующие инструменты. Далее подробнее разберем, как можно помочь разработчикам, а также каждую составляющую процесса испытаний: модель энергосистемы, машина реального времени и подключение устройств.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Требования к определенному виду противоаварийной автоматики и ее испытаний описываются в специальных отраслевых стандартах, в том числе СТО 59012820.29.020.002–2018 «Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования. Нормы и требования» (далее — стандарт) для автоматики ограничения перегрузки оборудования [1]. В документе описываются: требования к функциям устройства, методика проведения сертификационных испытаний, требования к средствам проведения испытаний.

Программа сертификационных испытаний в соответствии со стандартом должна содержать опыты, включающие в себя: проверки при таких возмущениях в сети, как короткие замыкания, замыкания на землю, различные набросы мощности из-за отключения или включения потребителей энергии или же изменения мощности генерирующего оборудования. Причем эти процессы должны затрагивать не только электрическую часть физики процесса, но и влияние движущихся масс в электрических генераторах и двигателях.

Так как устройства подключаются по измерительным цепям к энергосистеме, в том числе по цепям тока, стандарт описывает опыты с повреждением в них. Ввиду серьезных требований к самим устройствам, набору испытания и, как следствие, сложности имитационной модели, разработчикам и центрам моделирования необходим инструмент, который бы отвечал всем требованиям. Например, моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов разной сложности как в самой сети, так и во вторичных цепях.

Для этих целей как нельзя лучше подходит MATLAB/Simulink. Для целей физического моделирования электрических процессов подходит встроенная в программный комплекс библиотека элементов Simscape/Electrical, а в частности Specialized Power Systems для моделирования электроэнергетических систем. Данные библиотеки включают в себя множество различных элементов сети от электрических машин, трансформаторов, элементов сетей до элементов возобновляемых источников энергии и силовой электроники, а также логические элементы и средства измерения.

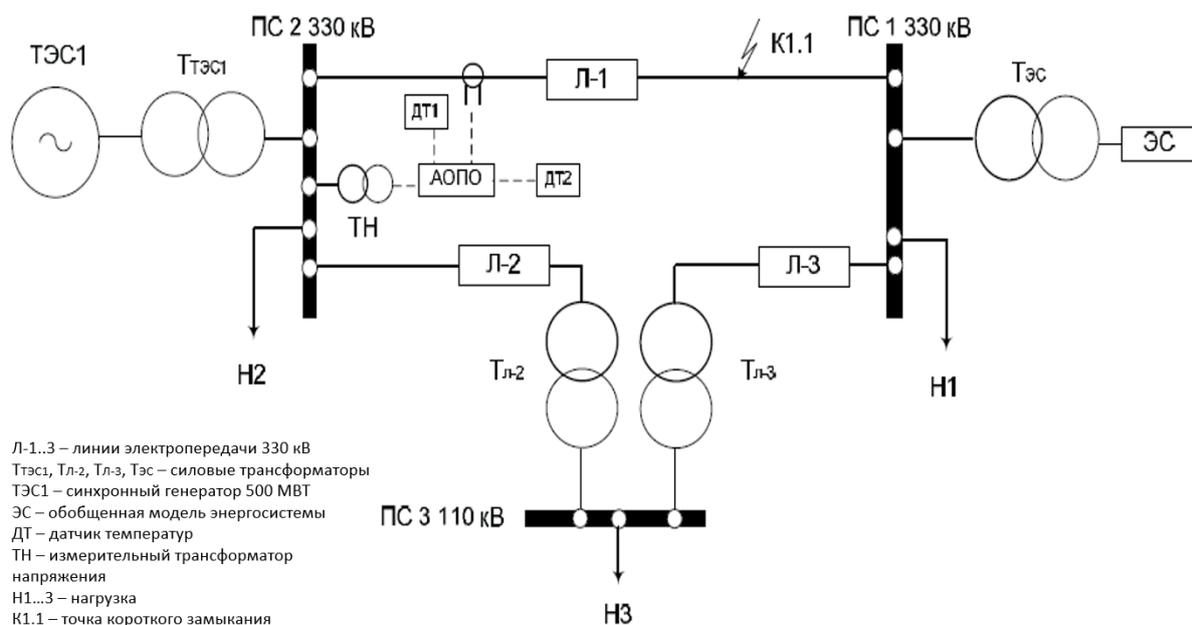


Рис. 1. Схема тестовой модели энергосистемы

Стандартом описана топология и состав силовых элементов в тестовой модели энергосистемы для испытания на ней автоматики ограничения перегрузки оборудования (рис. 1), а также описаны параметры этих элементов. Стандарт требует от модели достаточной детализации с учетом набора элементов. Все эти условия были учтены при разработке модели в Simulink.

Рассмотрим часть модели в Simulink (рис. 2). Она ответственна за «физику» процессов, происходящих в энергосистеме. Обозначения на Simulink модели полностью соответствуют схеме сети. Сеть представлена несколькими классами напряжения от 10 000 В до 330 000 вольт. Передача электроэнергии между частями энергосистемы осуществляется по линиям электропередачи (ЛЭП) 330 кВ. Из-за конструкции ЛЭП и характера протекающих токов в них имеют место эффекты само- и взаимоиндукции, а также наличия емкости между проводами и землей. В модели учитываются индуктивные и емкостные свойства ЛЭП, в том числе влияние геометрии расположения самих проводов, а также распределенный характер параметров ЛЭП.

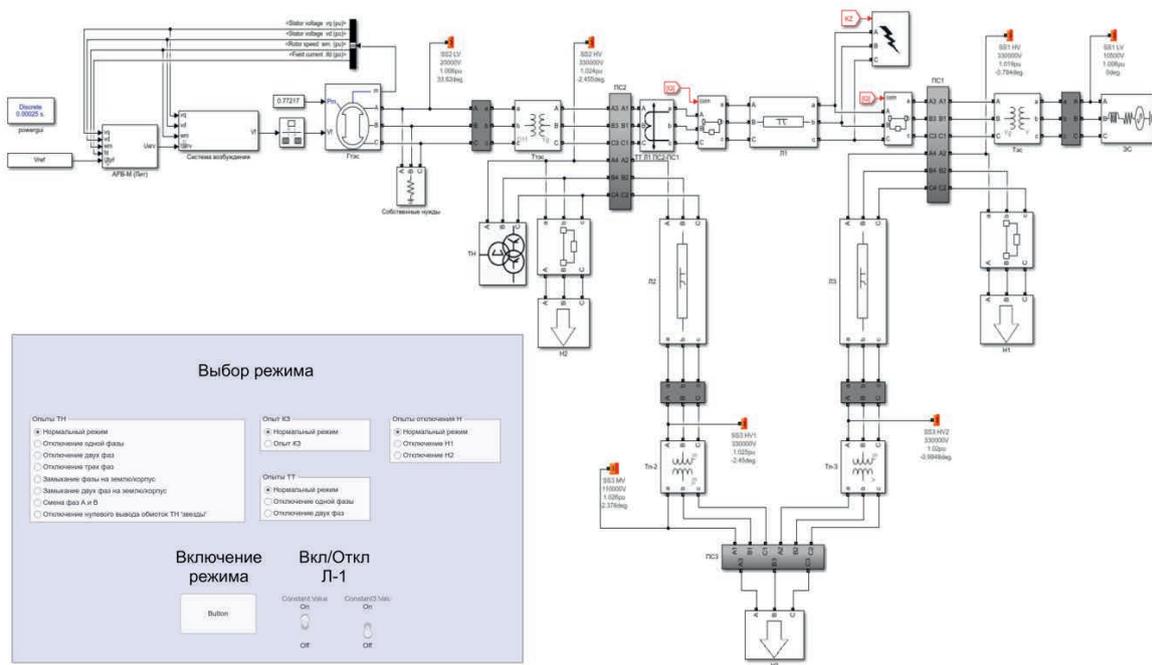


Рис. 2. Simulink-модель энергосистемы

Для перехода на другие классы напряжения, на которых, например, происходит генерация и потребление электроэнергии в сети, на каждой из трех подстанций ПС1, 2 и 3 предусмотрены силовые трансформаторы с разными классами напряжения и коэффициентами трансформации. Как известно, трансформаторы работают по принципу электромагнитной индукции, который в полной мере учитывается в модели, в том числе потери энергии и форма стального сердечника этих трансформаторов с его влиянием на магнитное поле.

Источником электроэнергии в модели является синхронный генератор большой мощности в 500 МВт. Модель выполнена с учетом уравнений Парка — Горева для описания синхронного генератора. Благодаря этому в модели будет учитываться вращение вала генератора и его влияние на электрический режим системы.

Дополнительно к модели генератора необходима модель алгоритма управления режимом работы генератора — автоматика регулировки возбуждения (АРВ), которая поддерживает необходимый уровень напряжения на обмотках генератора. Автоматика, ориентируясь на параметры генератора по определенному закону регулирования, контролирует напряжение на обмотке возбуждения и в следствие на роторе генератора.

На каждой подстанции есть обобщенные потребители активной мощности из сети, уровень потребления которых может меняться от 0 до 1ГВт, поэтому они смоделированы специальным динамическим блоком нагрузки.

Противоаварийная автоматика подключается к сети через специальные измерительные трансформаторы тока и напряжения, которые приводят токи и напряжения до безопасных для оборудования значений. Так как это трансформаторы, а до терминала или промежуточного АЦП идут цепи тока и напряжения, необходимо учитывать возможные в них замыкания.

Сама автоматика ограничения перегрузки оборудования, подключаемая к измерительному оборудованию, контролирует токовую нагрузку, а также направление перетока мощности по ЛЭП №1. Для управления моделью, в том числе во время работы в реальном времени, предусмотрена панель управления: она позволяет выбрать и запустить опыт из программы испытаний, например, вызвать КЗ или наброс нагрузки, а также управлять коммутационными аппаратами — силовыми выключателями.

В процессе моделирования энергосистемы встает вопрос о ее адекватности и соответствии выдвинутым требованиям. Стандартом описываются режимные параметры энергосистемы: уровни напряжения в ее узлах — на шинах подстанций, а также перетоки активной мощности от генерации к потребителям. В Simulink есть несколько инструментов, которые способны помочь в настройке модели для подтверждения ее сходимости со стандартом. Во-первых, для электроэнергетических систем есть инструмент «Load Flow tool», который рассчитывает режим работы энергосистемы в зависимости от заданных параметров сети и режима работы оборудования. При соблюдении всех тонкостей построения сети этот инструмент уже дает большую точность по каждому из параметров — погрешность менее 1% относительно предписанных значений. Чтобы еще больше приблизиться к требованиям, можно воспользоваться дополнительным инструментом — Parameter Estimator’ом. Он поможет настроить отдельные параметры режима до заданных величин путем итерационного перебора влияющих параметров до необходимой точности параметров режима. В итоге погрешность результатов измерения незначительна — тысячные доли процентов от предписанных значений (рис. 3).

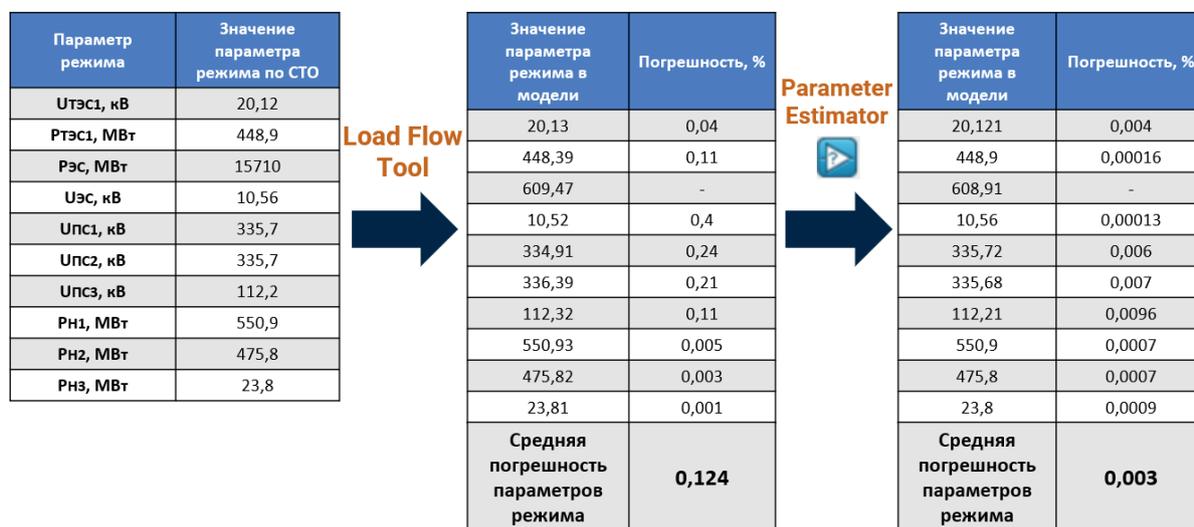


Рис. 3. Точность моделирования

Для демонстрации эффективности разработки и тестирования алгоритмов устройств противоаварийной автоматики в этом проекте разработали прототип автоматики ограничения перегрузки оборудования в соответствии с типовой архитектурой алгоритма, применяемой электроэнергетике. Например, по СТО 56947007–33.040.20.204-2015 «Типовые функции цифровых устройств противоаварийной автоматики ФСМ, ФТКЗ, АЧР, ЧАПВ, ЧДА, КПР, САОН, АОПО, АРПМ» [2].

Из основных требований к функциям, которые были выполнены в разработанном прототипе, следует выделить несколько основных. Функции АОПО выполняются с контролем тока прямой последовательности и направления трехфазной активной мощности, также допустимо использовать алгоритмы с контролем тока и направления активной мощности только одной фазы. АОПО содержит две ступени срабатывания, рассчитанные на разное значение перегрузки по току и разные управляющие воздействия на сеть. Также функция АОПО имеет адаптацию уставок к изменению температуры окружающего воздуха.

На рис. 4 указана Simulink-модель прототипа АОПО с указанием основных органов. Так как прототип АОПО будет принимать измерения из разработанной модели энергосистемы, а также отправлять управляющие воздействия в соответствии со стандартом МЭК 61850, в алгоритме предусмотрены органы для приема и обработки измерений тока и напряжения по SV — потокам, а также приема показаний датчика температур по GOOSE-сообщениям, и органы для формирования и отправки управляющих воздействий в модель энергосистемы по GOOSE-сообщениям. Алгоритм имеет измерительный орган для цифровой обработки принятых измерений тока и напряжения для выделения значения тока прямой последовательности и мощности протекающих по ЛЭП. В пусковом органе формируется сигнал пуска алгоритма в случае превышения значения тока уставки срабатывания, сформированной на основе показаний датчика температур. В исполнительной логике формируется сигнал срабатывания в случае совпадения направления перетока мощности с уставкой и существования сигнала пуска больше заданной выдержки времени.

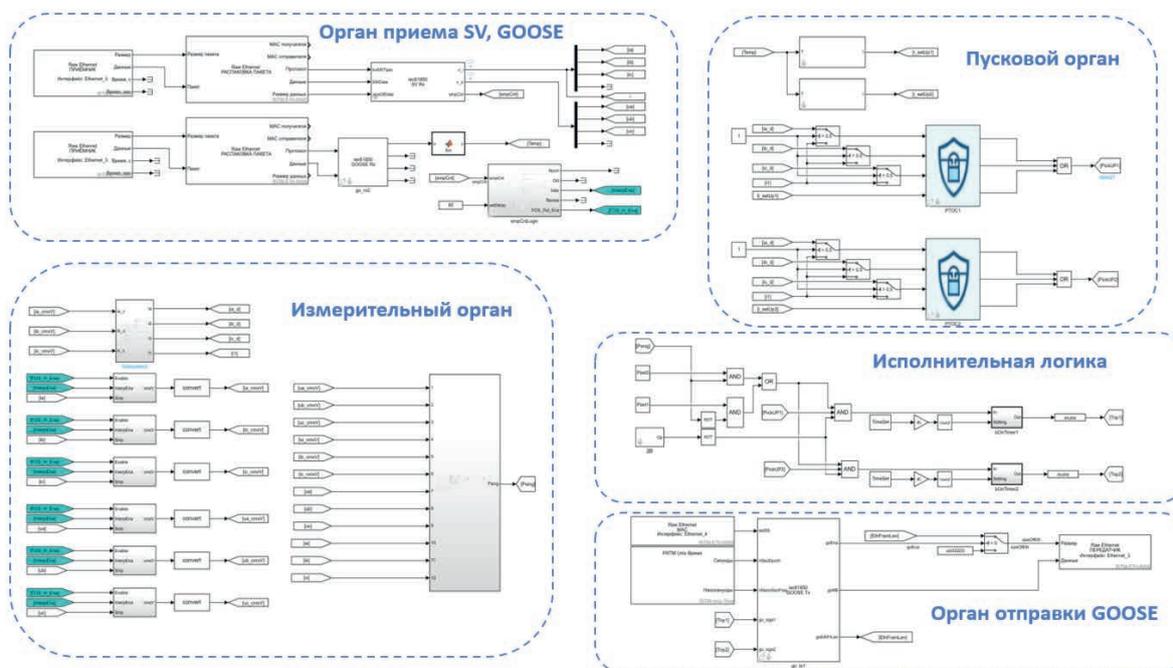


Рис. 4. Simulink-модель алгоритма АОПО

СТЕНД ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

Имея детальную модель тестовой энергосистемы и алгоритм противоаварийной автоматики, необходимо провести тестирование разработанной АОПО в соответствии с программой испытаний стандарта. В этом нам помогут машины реального времени на базе комплекса полунатурного моделирования РИТМ. Машина реального времени (далее — РИТМ) — это специальный компьютер, который предназначен для выполнения задач в режиме жесткого реального времени, то есть секунда модельного времени будет рассчитываться за секунду реального времени с учетом шага дискретизации модели. Например, модель энергосистемы будет обсчитываться с шагом 250 мкс при этом будет соблюдаться частота расчета в 4000 Гц, обеспечивая жесткое реальное время.

Комплекс РИТМ полностью интегрирован в MATLAB/Simulink, имеет свою отлаженную библиотеку для работы. Операционная система машины — операционная система реального времени, которая позволяет решать многие задачи в рамках разработки и испытания устройств. Например, быстрое прототипирование алгоритмов и их испытание на цифровых двойниках.

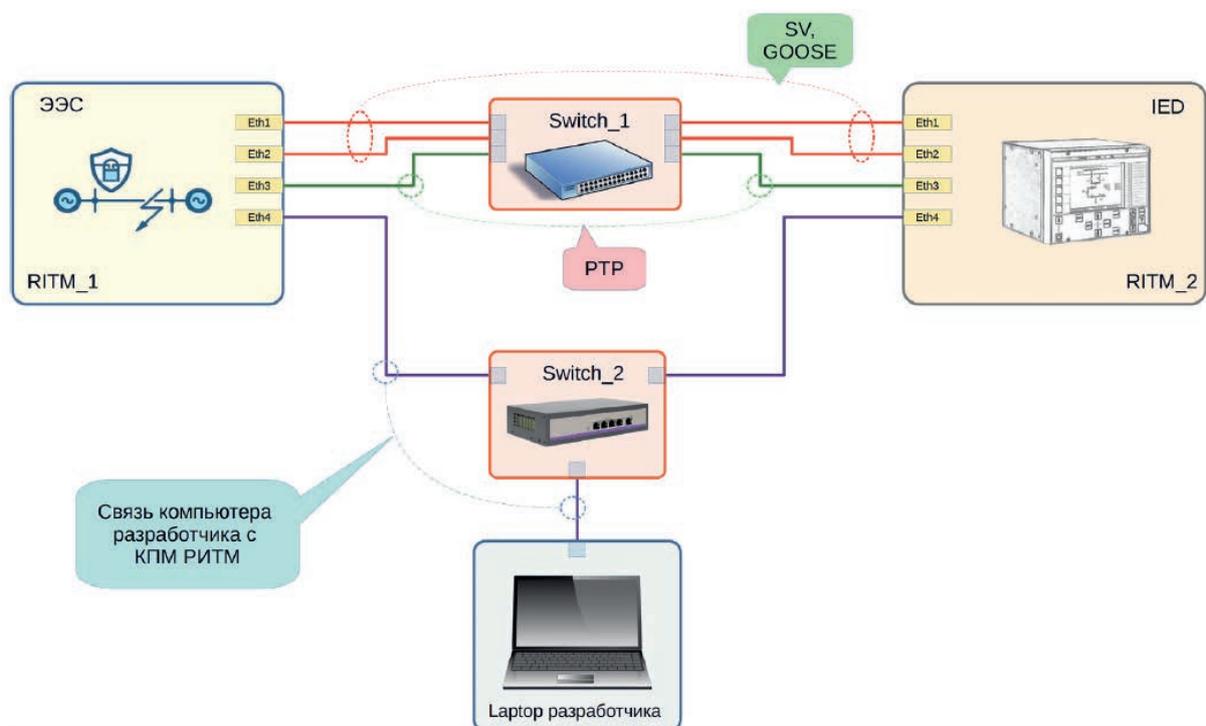


Рис. 5. Стенд цифровой подстанции

Стенд полунатурного моделирования, который можно назвать двойником цифровой подстанции, изображен на *рис. 5*. Модель энергосистемы (*рис. 2*) будет работать на машине реального времени RITM_1, выступая в роли цифрового двойника энергосистемы и при этом генерируя поток измерений тока ЛЭП № 1 и напряжения с шин ПС № 2 по SV-поток, а также показания датчиков температур воздуха по GOOSE-сообщениям в соответствии со стандартом МЭК 61850 по сети Ethernet. Шаг модельного времени был выбран равным 250 мкс для привязки к этим протоколам. В свою очередь прототип АОПО будет работать на второй машине RITM_2, которая будет выступать в качестве терминала противоаварийной автоматики и будет получать измерения по шине процесса МЭК 61850, обрабатывать их и выдавать управляющие воздействия по GOOSE-сообщениям обратно на цифровой двойник энергосистемы. Две машины РИТМ будут синхронизированы между собой по времени протоколом PTPv2. Также оба РИТМа имеют связь с компьютером разработчика, который может отслеживать измерения, трафик в сети и генерировать управляющие воздействия для запуска опытов. На *рис. 6* изображена реализация стенда цифровой подстанции в виде стойки.



Рис. 6. Реализация стенда цифровой подстанции

Для автоматизации работы разработчика во время тестирования на КПМ РИТМ с помощью MATLAB/Simulink возможно проводить автоматическую обработку результатов испытаний и составлять автоматизированный отчет после многих часов испытаний и их итераций. В рамках автотестирования был проведен опыт из программы испытаний по набросу мощности на ЛЭП №1 в ходе отключения нагрузки. На осциллограмме (рис. 7) представлена иллюстрация одного из опытов в ходе тестирования: видно повышение значения тока после отключения нагрузки и перераспределения потоков мощности. При этом был произведен пуск и срабатывание алгоритма автоматики через заданную выдержку времени.



Рис. 7. Осциллограмма испытания АОПО

На рис. 8 представлен пример отчета на основе испытаний по набросу мощности на ЛЭП с указаниями результатов испытаний и возможных причин неправильной работы. При этом разработчик после ночи такого автотестирования наутро сможет ознакомиться с отчетом и провести его анализ, при этом не тратя свое время на проведение однообразных серий испытаний.

Протокол автоматического тестирования

Опыт №9

Цель испытаний:

Проверка срабатывания при направлении перетока активной мощности по ЛЭП в контролируемом направлении.

Настройка устройства АОПО:

Заданы исходные уставки.

Аварийное возмущение:

Отключение нагрузки Н1. Токовая нагрузка по Л-1 превышает уставку срабатывания устройства АОПО.

Корректное действие устройства АОПО:

Срабатывание через заданную выдержку времени с выдачей УВ.

Результаты серии испытаний:

Всего выполнено тестов: 10

Всего затрачено времени на выполнение набора тестов: 200.012624 секунд.

Результаты работы 1 ступени:

Всего правильных пусков: 10.000000

Всего случаев неправильного пуска: 0.000000

Всего правильных срабатываний: 9.000000

Всего случаев неправильного срабатывания: 1.000000

Испытания с неправильным срабатыванием ступени:

- номер испытания: 6 описание: некорректное срабатывание

Результаты работы 2 ступени:

Всего правильных пусков: 10.000000

Всего случаев неправильного пуска: 0.000000

Всего правильных срабатываний: 10.000000

Всего случаев неправильного срабатывания: 0.000000

Рис. 8. Протокол испытаний

В рамках создания стенда цифровой подстанции для исследования и разработки противоаварийной автоматики были показаны возможности библиотек Simulink, которые позволяют реализовывать точные модели электроэнергетических объектов, при этом можно говорить о технологии цифровых двойников ввиду подробности этих моделей. Широкие возможности MATLAB/Simulink по исследованиям и тестированию алгоритмов в динамике и построение гибких моделей для испытаний позволяют повысить качество разработки продукта. А решения использования КПМ РИТМ и Simulink, в качестве основного инструмента разработчика цифровой релейной защиты и противоаварийной автоматики, покрывают и ускоряют все стадии процесса разработки вплоть до сертификационных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт АО «СО ЕЭС» (СТО 59012820.29.020.002–2018) «Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования. Нормы и требования».
2. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» (СТО 56947007–33.040.20.204-2015) «Типовые функции цифровых устройств противоаварийной автоматики ФСМ, ФТКЗ, АЧР, ЧАПВ, ЧДА, КПр, САОН, АОПО, АРПМ».
3. <https://exponenta.ru/>
4. <https://kpm-ritm.ru/>



 +7 (495) 009 65 85

 <https://exponenta.ru>

 info@exponenta.ru