

САНКИН
Артём Валерьевич

магистратура, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия),
artemsankin18111999@yandex.ru

ПУШКАРЬ
Даниил Андреевич

магистратура, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия),
pushkar.da@edu.spbstu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСОВ ЗАЩИТ И АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Научный руководитель:

Попов Станислав Олегович

Статья поступила: 25.05.2023;

Принята к публикации: 28.09.2023;

Размещена в сети: 30.09.2023.

Аннотация. В данной работе рассмотрены основные возможности применения программно-аппаратного моделирования при разработке комплексов защит и автоматики электроэнергетических систем, реализован ряд моделей элементов комплекса РЗА, организована и оптимизирована их совместная работа. Для подтверждения результатов разработки было проведено испытание микропроцессорного устройства с помощью полнофункционального программно-аппаратного комплекса, готового для применения и масштабирования.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика, операционная система реального времени, программно-аппаратный комплекс, цифровой двойник, микропроцессорный терминал, MatLab, LabView, моделирование

Для цитирования: Санкин А. В., Пушкарь Д. А. Применение программно-аппаратного моделирования при разработке комплексов защит и автоматики электроэнергетических систем // StudArctic Forum. 2023. Т. 8, № 3. С. 113–118.

Введение. Устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) предназначены для обеспечения надежной и безопасной работы энергосистемы в аварийных и ненормальных режимах. Однако для того, чтобы гарантировать правильное функционирование устройств РЗА, необходимо проводить их тестирование и диагностику при всевозможных возмущениях в энергосистеме на разных этапах эксплуатации. Это создает значительные трудности в обеспечении устойчивого функционирования не только отдельных устройств, но и всего комплекса РЗА.

Применение программно-аппаратного моделирования может значительно упростить и повысить качество всех этапов работы: разработки, проектирования, пуско-наладочных работ (ПНР) и эксплуатации. Создание диагностического комплекса на основе моделей защищаемого объекта и комплекса РЗА позволяет проводить тестирование и диагностику устройств РЗА в условиях, максимально приближенных к реальным, что позволяет существенно уменьшить трудозатраты на все вышеописанные работы и при этом повысить их качество. Для построения соответствующего диагностического комплекса необходимо

реализовать [Формализация]:

- модель защищаемого объекта;
- модель комплекса РЗА, включая детализированные цифровые двойники тестируемых устройств;
- вычисление моделей в реальном времени;
- средства сопряжения с реальными устройствами: высокоскоростной модуль ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов, коммутационный модуль, усилители тока и напряжения, промежуточные реле.

Описание применяемых методов моделирования на разных стадиях существования комплекса РЗА. Применение программно-аппаратного моделирования позволяет создать диагностический комплекс, который основывается на моделях защищаемого объекта и комплекса РЗА (рисунок 1). Это позволяет проводить тестирование и диагностику устройств РЗА в условиях, максимально приближенных к реальным, повышая надежность и безопасность работы энергосистемы. Кроме того, такие модели позволяют проводить многовариантные поисковые исследования, основанные на моделях первичной схемы защищаемого объекта, цифровых двойниках устройств и коммуникационной сети, что позволяет определить оптимальные алгоритмы функционирования [Зайцев].

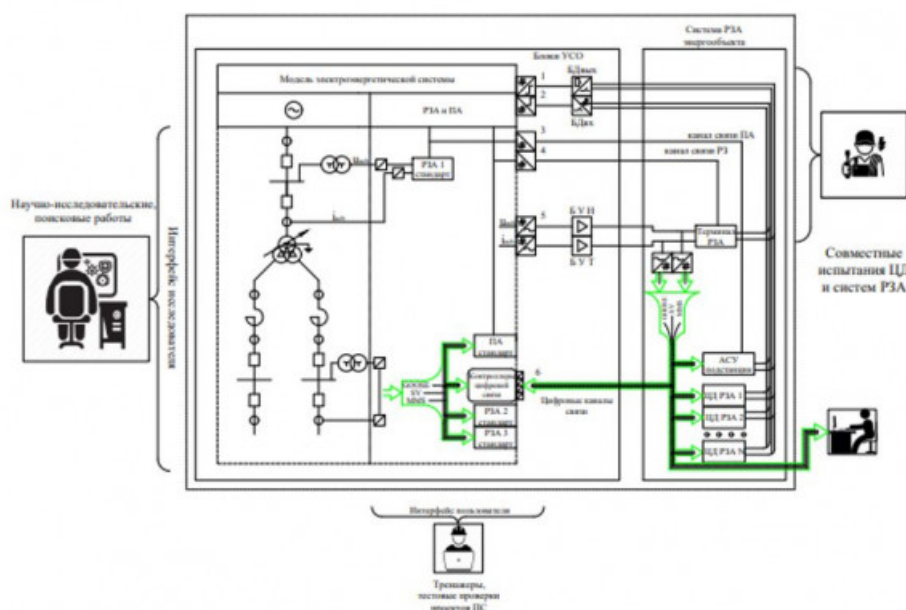


Рис. 1. Структурная схема программно-аналитического комплекса системы РЗА

Проектирование системы РЗА помимо решений по выбору уставок работы релейных защит включает в себя организацию контактно-релейных схем и локальной вычислительной сети для связи компонентов системы. Автоматизация программ тестирования и диагностики позволяет значительно ускорить процесс проектирования системы РЗА.

Для обеспечения надежности и безопасности работы энергосистемы на стадии ПНР необходимо проводить проверку работоспособности и функционального соответствия комплекса РЗА, установленного на реконструируемом или новом электроэнергетическом объекте. Разработанный комплекс позволяет производить такую проверку непосредственно на объекте благодаря включению в него средств сопряжения (усилители тока и напряжения, платы дискретных входов/выходов). Появляется возможность проводить испытания с помощью моделируемых аварийных режимов.

Помимо интеграции комплекса с отдельным элементом системы (терминалом РЗА),

комплекс может быть полноценно интегрирован в общую АСУ ТП объекта и использоваться для мониторинга работы системы РЗА на этапе эксплуатации.

Еще одним преимуществом является возможность использования комплекса в качестве тренажера для обучения персонала, работающего с новым оборудованием, в условиях, максимально приближенных к реальным.

Техническое решение комплекса РЗА. С помощью программы MATLAB&Simulink была создана модель защищаемого объекта, которая воспроизводит электромагнитные и электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. Используя программное обеспечение NI VeriStand, первоначальная модель в виде C кода была скомпилирована в исполняемую dll-библиотеку для дальнейшего использования в другой среде программирования. Цифровая модель комплекса РЗА была реализована с помощью среды программирования LabView.

Для моделирования цифровой части в операционной системе реального времени был использован контроллер серии PXI, который оснащен четырёхъядерным процессором, высокопроизводительными модульными приборами и модулями ввода-вывода.

Для моделирования в реальном времени используются детерминированные циклы, которые позволяют контролировать время итерации, порядок выполнения циклов и распределение процессов между ядрами контроллера [Чуфырев]. Это позволяет снизить нагрузку на одно ядро и ускорить работу комплекса РЗА в целом. Одно ядро отведено для задач первичной системы, таких как получение сигналов токов и напряжений, симуляция аварийных событий и управление выключателем. Остальные три ядра используются для моделирования устройств управления и обработки большого объема данных, включая функции защиты. Сигналы с цифровых двойников передаются между ядрами через синхронизированное буферное хранилище [Strasser].

Для мониторинга и дистанционного управления этой моделью был разработан АРМ для сбора MMS-сообщений от всех моделирующих элементов комплекса релейной защиты с использованием протокола передачи данных TCP/IP.

Аналоговые выходы модуля коммутации подключены к блокам усилителей тока и напряжения, с которых они поступают на измерительные входы терминала. Дискретные входы и выходы модуля коммутации подключаются через промежуточные реле.

Структурная схема реализованной системы реального времени представлена на рисунке 2.

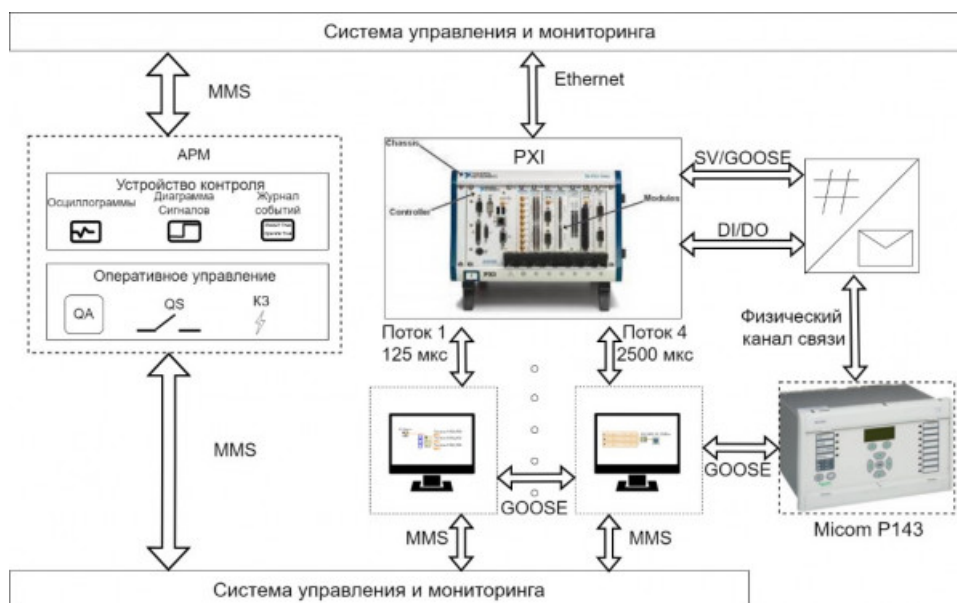


Рис. 2. Структурная схема реализованной системы реального времени

Проведение тестирования микропроцессорного устройства релейной защиты и автоматики. Разработанный аппаратно-программный комплекс используется для эксплуатационных испытаний оборудования релейной защиты и автоматики в составе действующего комплекса релейной защиты и автоматики подстанции и включает в себя девять релейных терминалов, выполняющих функции защиты и управления. Сформированная модель содержит более 40 000 сигналов.

Подключение программно-аппаратного комплекса к терминалу РЗА и АРМ для проведения испытаний представлено на рисунке 3.

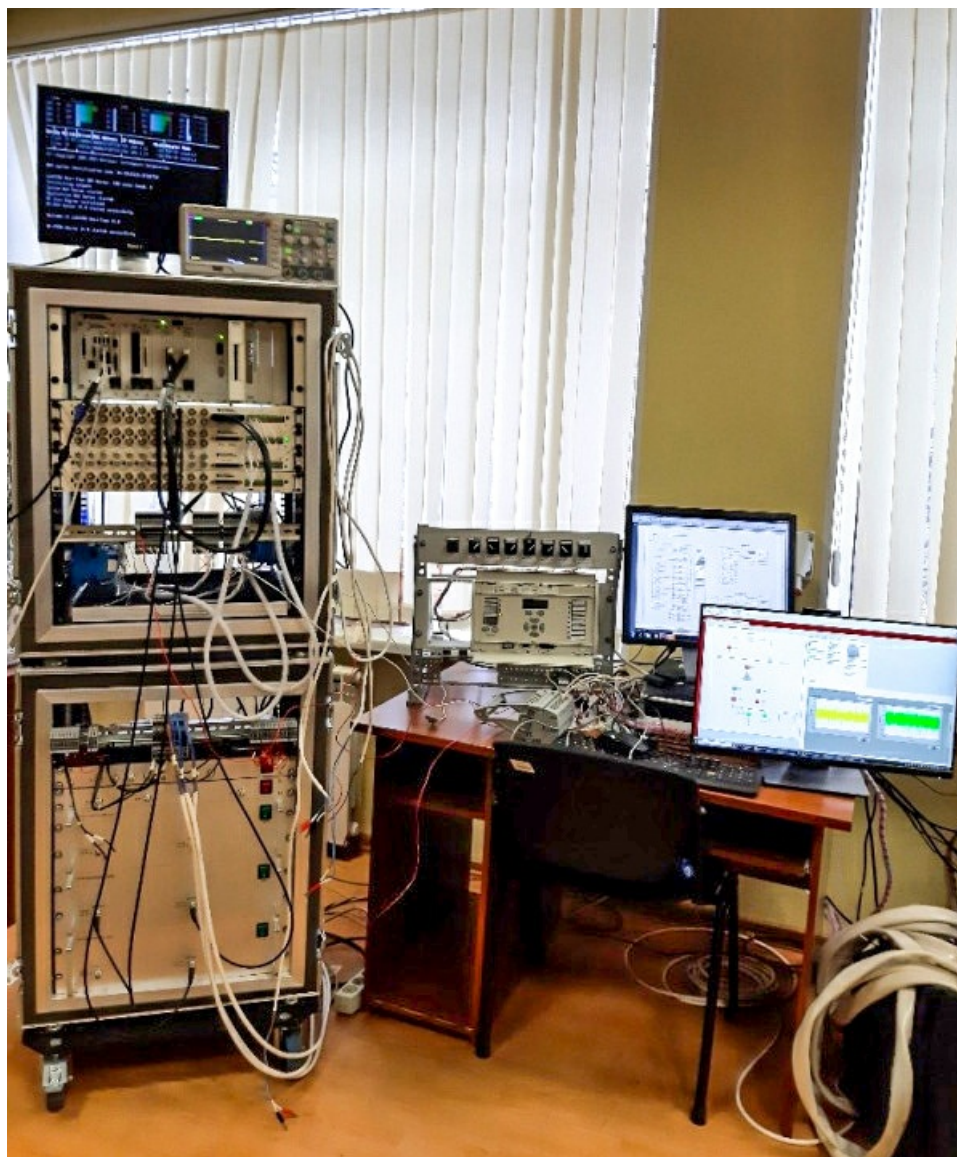


Рис. 3. Подключение программно-аппаратного комплекса к терминалу РЗА и АРМ для проведения испытаний

В результате разработанной комбинации программных и аппаратных средств была проведена серия автоматизированных испытаний терминалов MiCOM P143 компании Schneider Electric. Сопряжение выполнялось по трём каналам тока, четырём каналам напряжения и 40 дискретными каналами. Тесты включали проверку функции защиты устройства с точки зрения селективности работы с другими устройствами в системе, проверку алгоритмов работы устройства, схем подключения с другими терминалами и

проверку точности уставок в различных режимах работы [Волошин].

Критерием качества работы терминалов в режиме тестирования является своевременность срабатывания функций устройств, корректность сигналов управления, выдаваемых в модель устройства, и отсутствие срабатывания логических функций в ситуациях, когда они запрещены. После успешного проведения тестирования правильно работающего (эталонного) устройства в нём были реализованы различные «ошибки», которые, благодаря повторным испытаниям, были обнаружены и локализованы.

Автоматическое тестирование терминала РЗА является более эффективным и точным способом проверки, чем ручная проверка. С помощью программного комплекса проводится большое количество тестов и контрольных режимов – 211, что позволяет значительно снизить вероятность ошибок. Среднее время проведения одного автоматического тестового режима составляет всего 5 секунд, а полное автоматическое тестирование занимает всего 20 минут, в то время как ручная проверка может занимать от 1 до 3 дней.

Следующей поставленной задачей является реализация полноценного автоматизированного алгоритма тестирования, диагностики и локализации неисправности различных устройств и комплексов РЗА.

Заключение. В результате исследования были рассмотрены основные методы применения программно-аппаратного моделирования при разработке комплекса РЗА. На основе разработанного комплекса было выявлено, что комплекс может быть применен для решения задач по увеличению скорости и оптимизации процессов при разработке, проектировании, пусконаладочных работах, эксплуатации системы РЗА. Определены основные технические решения, необходимые для реализации программно-аппаратной модели. Найдены пути для оптимизации ее работы. Было проведено тестирование комплекса и получены результаты, доказывающие эффективность применения таких комплексов на действующих объектах и найдены возможные пути для улучшения разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зайцев А.А. Применение цифровых двойников для диагностики микропроцессорных устройств РЗА / А.А. Зайцев, Д.П. Пушкарь, С.О. Попов // Современные технологии и экономика в энергетике: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2022 года. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 280-282.

Формализация функциональных требований к релейной защите и автоматике цифровой подстанции / А.А. Волошин, А.А. Лебедев, Д.О. Благоразумов, В.А. Вальгер // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2022. № 5. С. 30-38.

Чуфырев А.Е. Технический обзор особенностей операционной системы реального времени TI-RTOS / А.Е. Чуфырев, В.А. Устюгов // *Juvenis Scientia*. 2016. № 1. С. 3-7.

Strasser T. Real time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis // *IEEE Power and Energy Technology Systems*, 2015. Vol. 2. U R L : <https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/pets-j-open-access-papers/PESOAP0380.html> (Accessed: 03.09.2023)

Voloshin A.A. Development of a technique for automated testing of digital protection and automatic control system of substation / A.A. Voloshin, S.M. Nukhulov // 5th International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), 2022. DOI:[10.1109/RPA57581.2022.9951128](https://doi.org/10.1109/RPA57581.2022.9951128) (Accessed: 03.09.2023)

Artyom V. SANKIN

master's degree, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russia),
artemsankin18111999@yandex.ru

Daniil A. PUSHKAR

master's degree, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russia),
pushkar.da@edu.spbstu.ru

USING HIL SIMULATION FOR THE DEVELOPMENT OF PROTECTION AND AUTOMATION COMPLEXES OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Scientific adviser:

Stanislav O. Popov

Paper submitted on: 05/25/2023;

Accepted on: 09/28/2023;

Published online on: 09/30/2023.

Abstract. This paper investigates the main possibilities for using hardware-in-the-loop (HIL) simulation for the development of protection and automation complexes of electric power systems, describes implementation of a number of models of the relay protection and automation complex models, as well as organization and optimization of their combined work. To confirm the development results, a microprocessor-based device was tested using a full-featured hardware-software complex ready for application and scaling.

Keywords: relay protection and automation, real-time operating system, hardware-software complex, digital twin, microprocessor terminal, MatLab, LabView, simulation

For citation: Pushkar, D. A. Using HIL Simulation for the Development of Protection and Automation Complexes of Electric Power Systems. *StudArctic Forum*. 2023, 8 (3): 113–118.

REFERENCES

Zaitsev A.A., Pushkar D.P., Popov S.O. Application of digital twins for diagnostics of microprocessor-based RPA devices. *Modern technologies and economics in power engineering: Proceedings of the international scientific and practical conference, Saint-Petersburg, April 27, 2022*. St. Petersburg, POLITEKH-PRESS, 2022, pp. 280-282. (In Russ.)

Voloshin A.A., Lebedev A.A., et. al. Formalization of functional requirements for digital substation protection and automatic control systems. *Vestnik Moskovskogo Energeticheskogo Instituta. Vestnik MEI*, 2022, No. 5, pp. 30-38. (In Russ.)

Chufyrev A.E., Ustyugov V.A. Technical overview of features of real-time operating system TI-RTOS. *Juvenis Scientia*, 2016, No. 1, pp. 3-7. (In Russ.)

Strasser T. Real time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis. *IEEE Power and Energy Technology Systems*, 2015, Vol. 2. URL : <https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/pets-j-open-access-papers/PESOAP0380.html> (Accessed: 03.09.2023)

Voloshin A.A., Nukhulov S.M. Development of a technique for automated testing of digital protection and automatic control system of substation. *5th International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA)*, 2022. DOI:[10.1109/RPA57581.2022.9951128](https://doi.org/10.1109/RPA57581.2022.9951128) (Accessed: 03.09.2023)