

Информатика и вычислительная техника

Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.942

DOI: 10.14529/ctcr240301

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

О.В. Логиновский, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

Д.В. Топольский, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

Н.Д. Топольский, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

А.Е. Беляков, alex.beliakov@susu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-7823-3071>

В.А. Белякова, pochinskaiava@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В представленной работе рассматривается вариант реализации цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов средствами универсальной SCADA-системы. Основой конструкции испытательного стенда является следящий гидропривод с гидростатическими направляющими. Цифровые измерительные трансформаторы должны иметь срок службы не менее 25 лет, межповоротный интервал – 8 лет и более. Для достижения таких высоких эксплуатационных характеристик необходимо проведение большого количества испытаний для подобных изделий. В частности, для проверки надежности работы этого класса устройств необходимо проведение испытаний на диагностическом вибростенде. Задача создания испытательных стендов на основе следящего гидропривода с гидростатическими направляющими является актуальной научно-технической задачей. Разработана архитектура цифрового двойника системы управления испытательного стенда. Для тестирования функционала приложения полностью имитационное моделирование работы цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов. **Цель исследования:** на основе анализа режимов работы испытательного стенда и вариантов реализации цифровых двойников разработать прототип системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов средствами универсальной SCADA-системы. **Материалы и методы.** Поставленные научные задачи решены с применением ключевых методов цифровизации производства, компьютерного и имитационного моделирования взаимодействия цифрового двойника с элементами системы управления испытательного стенда. **Результаты.** Основным практическим результатом проведенных исследований является разработка цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов. Предлагается при программной реализации цифрового двойника использовать отечественную универсальную SCADA-систему. **Заключение.** Анализ вариантов реализации цифрового двойника показал, что применение универсальных SCADA-систем упрощает процесс разработки. Подобные программные комплексы обеспечивают возможность управления автоматизированными технологическими процессами, проведения сбора и обработки данных в реальном времени, отслеживания состояния оборудования и хода производственных процессов, а также быстрого реагирования на любые неполадки. При разработке цифрового двойника использование универсальной SCADA-системы обосновано. Прототипирование системы управления испытательного стенда выполнено средствами универсальной отечественной SCADA-системы. Разработан OPC-сервер для обмена данными с микроконтроллером семейства STM32 в приложении Modbus Universal MasterOPC и проект в системе MasterSCADA. Тестирование приложения показало полную работоспособность разработанного проекта.

Ключевые слова: цифровой измерительный трансформатор, цифровой двойник, испытательный стенд, SCADA-система, имитационное моделирование

Благодарности. Работа выполнена за счет средств областного бюджета в виде субсидии на реализацию научно-технических проектов Челябинской области, включенных в перечень проектов Уральского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня «Передовые про-

изводственные технологии и материалы» в 2022 году (соглашение № 604 от 22.12.2022) проект «Разработка отечественного программного комплекса для управления, настройки и диагностики следящего гидропривода с гидростатическими направляющими», в рамках проекта «Разработка и создание производства следящих гидроприводов с гидростатическими направляющими (СГ с ГСН)».

Для цитирования: Разработка цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов / О.В. Логиновский, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr240301

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240301

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF THE CONTROL SYSTEM TEST BENCH FOR DIGITAL INSTRUMENT TRANSFORMERS

O.V. Loginovskiy, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

D.V. Topolskii, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

N.D. Topolskii, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

A.E. Beliakov, alex.beliakov@susu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-7823-3071>

V.A. Beliakova, pochinskaiava@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The presented work considers the option of implementing a digital twin of a test bench control system for digital instrument transformers using a universal SCADA system. The basis of the design of the test bench is a hydraulic servo drive using hydrostatic guides. Digital instrument transformers must have a service life of at least 25 years, a verification interval of 8 years or more. To achieve such high performance characteristics, a large number of tests are required for such products. In particular, to check the reliability of operation of this class of devices, it is necessary to conduct tests on a diagnostic vibration stand. The task of creating test benches based on a hydraulic servo drive using hydrostatic guides is an urgent scientific and technical task. The architecture of a digital twin of the test bench control system has been developed. To test the functionality of the application, a simulation of the operation of a digital twin of the control system of a test bench for digital instrument transformers was performed. **Aim.** Based on an analysis of the operating modes of the test bench and options for implementing digital twins, develop a prototype of a test bench control system for digital instrument transformers using a universal SCADA system. **Materials and methods.** The posed scientific problems were solved using key methods of digitalization of production, computer and simulation modeling of the interaction of the digital twin with elements of the test bench control system. **Results.** The main practical result of the research is the development of a digital twin of the test bench control system for digital instrument transformers. It is proposed to use the domestic universal SCADA system when implementing the digital twin in software. **Conclusion.** Analysis of options for implementing a digital twin showed that the use of universal SCADA systems simplifies the development process. Such software systems provide the ability to control automated technological processes, collect and process data in real time, monitor the condition of equipment and the progress of production processes, as well as quickly respond to any problems. When developing a digital twin, the use of a universal SCADA system is justified. Prototyping of the test bench control system was carried out using a universal domestic SCADA system. An OPC server has been developed for data exchange with a microcontroller of the STM32 family in the Modbus Universal MasterOPC application and a project in the MasterSCADA system. Testing of the application showed the full functionality of the developed project.

Keywords: digital instrument transformer, digital twin, test bench, SCADA system, simulation

Acknowledgments. The study was executed due to the Chelyabinsk region budget by subsidizing of scientific-technical projects from roster study projects of the world-class Interregional Ural Scientific and Educational Institution “Forward Industrial Technologies and Materials” in 2022 (contract number 604, 12/22).

For citation: Loginovskiy O.V., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliakov A.E., Beliakova V.A. Development of a digital twin of the control system test bench for digital instrument transformers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240301

Введение

Цифровая трансформация сегодня затрагивает подавляющее большинство отраслей производственной и непроизводственной деятельности человека. В том числе активное развитие получают интеллектуальные энергосистемы, являющиеся неотъемлемым элементом умного производства и одной из основ качественного уклада жизни огромного числа людей. Поэтому при переходе к новому технологическому уровню в области цифровизации энергосистем задействованы существенные ресурсы и современные достижения в информационных и коммуникационных технологиях, электронике, экономике и управлении [1, 2].

Основой перехода к интеллектуальным энергосистемам является создание новых программно-технологических комплексов, в частности, переход на технологию цифровых электроподстанций. В свою очередь, это подразумевает разработку и организацию массового производства цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Цифровые (электронные) измерительные трансформаторы (ИТ) на цифровых подстанциях приходят на замену традиционным ИТ. Помимо того, что по сравнению с традиционными ИТ электронные ИТ имеют меньшие массу, габариты, стоимость и пожароопасность, они благодаря развитию компьютерных технологий уже могут быть наделены слабым искусственным интеллектом. По сути они являются киберфизическими устройствами, на которые может быть возложена часть функций управления программно-технологическими комплексами в составе интеллектуальных энергосистем [3, 4].

Цифровые ИТ должны иметь срок службы не менее 25 лет, межповерочный интервал – 8 лет и более. Для достижения таких высоких эксплуатационных характеристик необходимо проведение большого количества испытаний для подобных изделий. В частности для проверки надежности работы этого класса устройств необходимо проведение испытаний на диагностическом вибростенде (рис. 1), в состав которого входят гидроцилиндр с гидростатическими направляющими (ГП с ГСН), электрогидравлический усилитель мощности (ЭГУМ), датчик положения (ДП), стендовое испытательное оборудование, персональный компьютер (ПК) и платформа, на которой располагается объект испытаний – цифровой ИТ. Соответственно, ЭГУМ включает в себя электронный блок управления (ЭБУ), высоко-частотную золотниковую пару (ВЗП) и электромеханический преобразователь (ЭМП) [5].

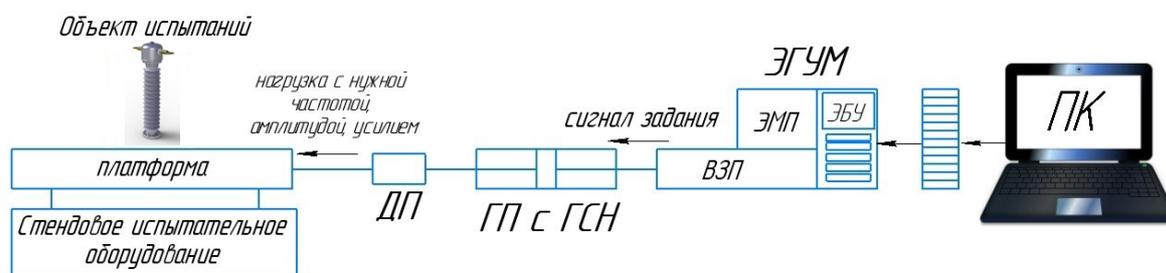


Рис. 1. Объект испытаний на вибростенде
Fig. 1. Test object on a vibration stand

Благодаря применению специальных гидростатических направляющих в конструкции гидропривода используемый в испытательном стенде гидропривод обладает ресурсом работоспособности в эксплуатационных нагрузках до 100 млн циклов. Задача создания ГП с ГСН является актуальной научно-технической задачей. ГП с ГСН является инновационным импортозамещающим продуктом на отечественном рынке. В настоящее время ведется разработка системы управления для конфигурации и мониторинга параметров ГП с ГСН, разработанного Уральским инженеринговым центром (УРИЦ) [6]. В целях повышения эффективности работ и сокращения времени разработки в проекте применена технология использования цифровых двойников.

1. Постановка задач

Поскольку все компоненты стенда в настоящее время реализованы на уровне прототипов, то целесообразно применение технологии цифровых двойников для распараллеливания процесса разработки аппаратуры и программного обеспечения [7, 8]. Поэтому при разработке системы

управления испытательным стендом закономерно её предварительное прототипирование на основе цифрового двойника.

Цифровой двойник применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, включающих в себя разработку, изготовление и эксплуатацию. С учетом большого количества определений понятия «цифровой двойник» при решении задач проекта под цифровым двойником будем понимать программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды [9].

Цифровые двойники представляют собой, как правило, сложный программный продукт, который создается на основе самых разнообразных данных и технологий. Уже на этапе эскизного проектирования с использованием программного обеспечения для проведения имитационного моделирования возможно создание вариаций системной модели разрабатываемого изделия с целью оценки и выбора наилучшего технического решения. Далее на этапе технического проектирования полученная на предыдущем этапе модель может дорабатываться и уточняться. Эти цифровые двойники постоянно обновляются вслед за изменением физических прототипов [10, 11].

Аппаратную основу системы управления диагностическим стендом представляет собой ЭБУ, входящий в состав ЭГУМ. ЭБУ взаимодействует с программным комплексом для управления, настройки и диагностики следящего ГП с ГСН, установленным на ПК, и с ВЗП, обеспечивающей задание управляющего воздействия на испытательный стенд. С программным комплексом ЭБУ взаимодействует посредством протоколов Modbus RTU и Modbus TCP, удовлетворяющих режиму SRT(Soft-Real-Time), с ВЗП ЭБУ взаимодействует посредством ЭМП. Таким образом, физическим прототипом ЭБУ будет являться плата-имитатор на базе микроконтроллера семейства STM32 и со встроенной поддержкой USB (рис. 2).

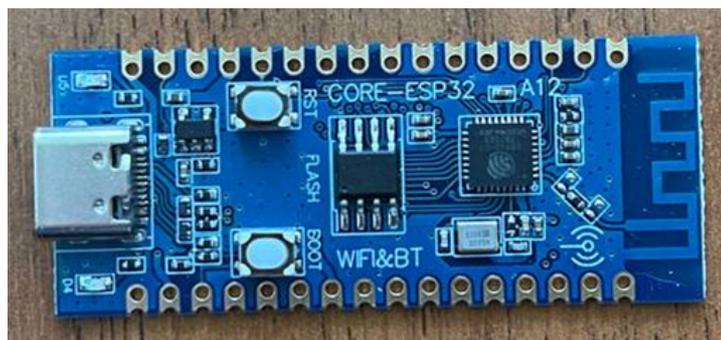


Рис. 2. Плата-имитатор ЭБУ
Fig. 2. Electronic control unit signal simulator

Таким образом, при создании полноценного цифрового двойника необходимо осуществить выбор или разработку программного обеспечения для осуществления имитационного моделирования, которое способно взаимодействовать с платой-имитатором ЭБУ в режиме, близком к реальному времени, в целях обеспечения автоматизированной работы ГП с ГСН и выполнения функций управления, наладки и диагностики исполнительных механизмов испытательного стенда.

2. Обоснование выбора пути решения задач проекта по созданию цифрового двойника системы управления испытательного стенда

В настоящее время стандартным компонентом автоматизированных систем управления технологическим процессом являются SCADA-системы. Подобные программные комплексы обеспечивают возможность управления автоматизированными технологическими процессами, проведения сбора и обработки данных в реальном времени, отслеживания состояния оборудования и хода производственных процессов, а также настройки сигнализаций и быстрого реагирования на любые неполадки. SCADA-системы также позволяют осуществлять контроль удаленных объектов на расстоянии, а управленческие права диспетчера могут автоматически изменяться в зависимости от текущего состояния технологических процессов [12, 13].

Структура SCADA-системы включает в себя три основных компонента (рис. 3):

Remote Terminal Unit (RTU) – удаленный терминал, осуществляющий обработку задачи в режиме реального времени. Конкретика его реализации определяется спецификой применения.

Master Terminal Unit (MTU) – диспетчерский пункт управления (главный терминал) осуществляет обработку данных и управление высокого уровня, как правило, в режиме мягкого (квази-) реального времени. В зависимости от особенностей системы управления MTU может быть реализован в самом разнообразном виде от одиночного компьютера с дополнительными устройствами подключения к каналам связи до больших вычислительных систем.

Communication System (CS) – коммуникационная система (каналы связи), необходима для передачи данных с удаленных точек (объектов, терминалов) на диспетчерский пункт управления и передачи сигналов управления на RTU.



Рис. 3. Компоненты SCADA-системы
Fig. 3. SCADA components

Структура, приведенная на рис. 3, во многом совпадает со структурой разрабатываемого цифрового двойника. Поэтому представляется возможным использование универсальной SCADA-системы в качестве прототипа управляющего программного комплекса. В силу условий проекта в рассмотрении участвовали только отечественные надежные SCADA-системы. Сравнение вариантов использования универсальных SCADA-систем применительно к задаче прототипирования системы управления испытательного стенда приведено в таблице [14, 15].

Таблица

Анализ вариантов реализации прототипа

Table

Analysis of prototype implementation options

Критерий анализа	Trace Mode	КРУГ-2000	САРГОН	MasterSCADA
Совместимость с операционными системами	Windows (7, 8, 10), Linux и macOS	Windows (XP, 7, 8, 10), Linux (Ubuntu, CentOS)	Windows (CE, 7, 8, 10), Linux (Ubuntu, CentOS, Red Hat, Debian)	Windows (10 и все более поздние), Linux (любые дистрибутивы), macOS
Поддержка промышленных протоколов	Modbus, OPC, DNP3, BACnet, SNMP, MQTT, Profibus, Ethernet/IP, M-Bus	Modbus, DNP3, OPC, BACnet, SNMP, MQTT, CANopen	Modbus, OPC, SNMP, BACnet	Modbus, OPC, SNMP, BACnet, DNP3
Поддерживаемые базы данных	Microsoft SQL Server, MySQL, PostgreSQL, Oracle Database, SQLite	Microsoft SQL Server, PostgreSQL, MySQL, SQLite	Microsoft SQL Server, MySQL/MariaDB, PostgreSQL, Oracle Database	Microsoft SQL Server, PostgreSQL, MySQL, Oracle Database
Встроенные языки программирования	C/C++, Visual Basic Scripting, JavaScript	C/C++	Java, C#, SQL, JavaScript, Python	Ladder Logic, Structured Text, C/C++, Visual Basic, JavaScript, Java
Интеграция в системы управления	Протоколы связи, драйвера, веб-интеграция, интеграция с базами данных	Протоколы коммуникации, интеграция с базами данных, веб-сервисы, интеграция с SCADA-системами, API и SDK	Веб-сервисы, сетевые подключения	Протоколы коммуникации, веб-сервисы, пользовательские драйверы

Критерий анализа	Trace Mode	КРУГ-2000	САРГОН	MasterSCADA
Обслуживание	Обновление ПО; обучение и консультации; диагностика системы; восстановление данных	Диагностика и мониторинг, журнал событий, резервное копирование и восстановление	Обновление ПО; обучение и консультации; диагностика системы; восстановление данных	Большое сообщество пользователей, документации и обучение, обновление ПО, управление пользователями и их правами
Простота разработки и развития	Позволяет создавать системы управления и контроля процессов без необходимости глубоких знаний программирования, что делает ее доступной для широкого круга пользователей	Для сложных и крупных проектов, требующих значительного изменения архитектуры системы, интеграции с большим количеством устройств и систем, разработка и развитие системы КРУГ-2000 может быть сложной и требующей профессиональных знаний и опыта	Требует огромных денежных ресурсов и специалистов высокой квалификации	Позволяет создавать системы управления и контроля процессов без необходимости глубоких знаний программирования, что делает ее доступной для широкого круга пользователей

При разработке цифрового двойника использование универсальной отечественной SCADA-системы обосновано. Результаты проведенного анализа указывают на преимущества создания цифрового двойника на основе MasterSCADA. В соответствии с выбором данного варианта реализации цифрового двойника стенда вытекают нижеприведенные программные решения при проведении имитационного моделирования.

3. Имитационное моделирование работы системы управления испытательного стенда

Проверка адекватности взаимодействия системы с компонентами испытательного стенда проведена путем проведения имитационного моделирования. Целью имитационного моделирования являлось изучение состояния регистров ЭБУ в процессе выполнения технологических операций.

При реализации цифрового двойника потребовалось создание проекта MasterSCADA и OPC-сервера. MasterSCADA опрашивает и записывает данные в OPC-сервер, который предоставляет данные в формате «тегов». Сами теги представляют собой объектно-ориентированные сущности – регистры ЭБУ. С помощью такого интерфейса удобно управлять всем стендом с помощью SCADA-системы. Цифровая передача данных между ЭБУ и программным комплексом в режиме SRT осуществляется с частотой от единиц до десятков герц. Режим SRT не позволяет в реальном времени считывать данные осциллограмм с отсчетами в микросекунды. По этой причине в проекте SCADA-системы заложены алгоритмы пакетной передачи данных, которые в автоматическом режиме позволяют взаимодействовать с регистрами ЭБУ. Разработанное приложение позволяет записывать регистры и представлять результаты вычислений в соответствии с запросом заказчика. На рис. 4 представлена структурная схема OPC-сервера.

Приложение MasterOPC Modbus Universal Server позволяет использовать такие объекты, как узел, устройство, группу (используется для удобства, например, если теги возможно объединить по общему признаку) и тег (HOLDING REGISTER). Для каждого из элементов необходимо задать параметры для подключения и в дальнейшем корректного обмена между эмулятором ЭБУ и сервером SCADA. Структурная схема проекта SCADA-системы представлена на рис. 5.

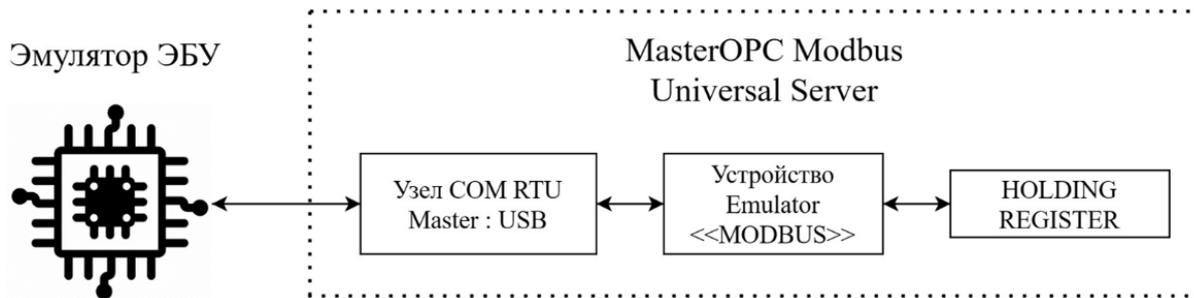


Рис. 4. Структурная схема OPC-сервера
Fig. 4. Block diagram of an OPC server

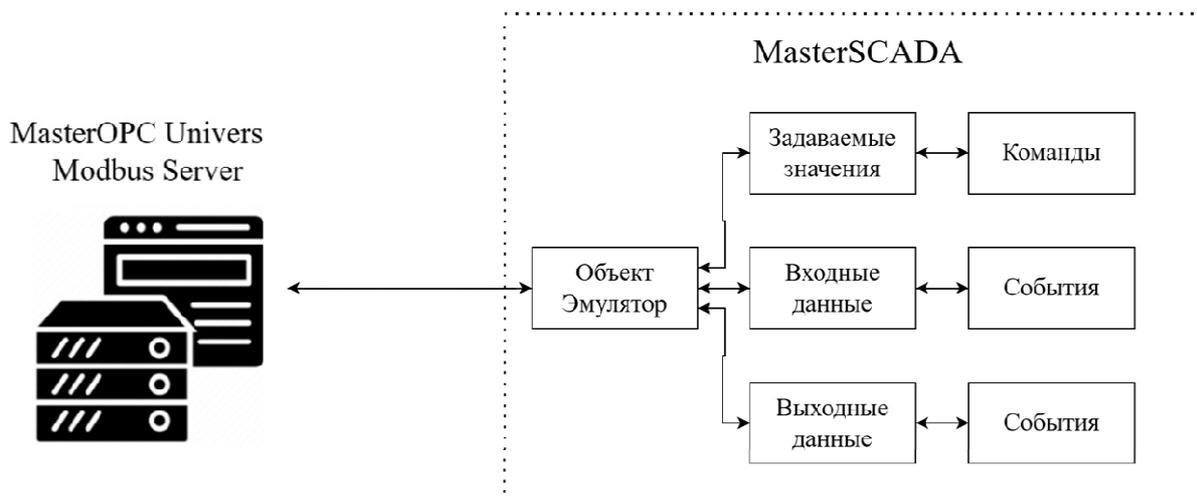


Рис. 5. Структурная схема проекта SCADA-системы
Fig. 5. Block diagram of the SCADA system project

Логика обмена данными между проектом в MasterSCADA и OPC-сервера в Modbus Universal MasterOPC представлена на рис. 6.

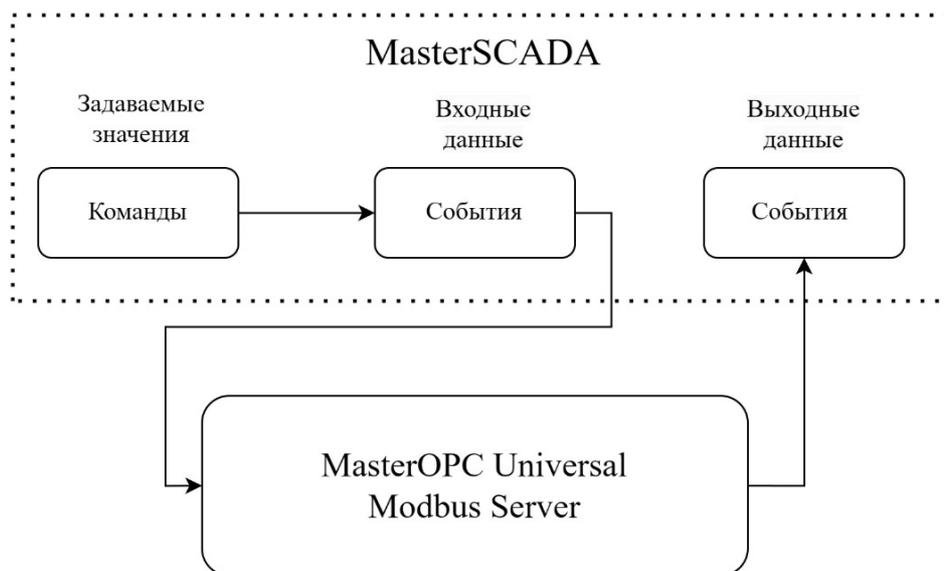


Рис. 6. Модель передачи данных между проектом MasterSCADA и OPC-сервером
Fig. 6. Data transfer model of the MasterSCADA project -OPC server

Конфигурация проекта в MasterSCADA представлена на рис. 7.



Рис. 7. Конфигурация проекта SCADA-системы
Fig. 7. SCADA project configuration

Реализация алгоритма ввода-вывода данных имитатора средствами MasterSCADA представлена на рис. 8.

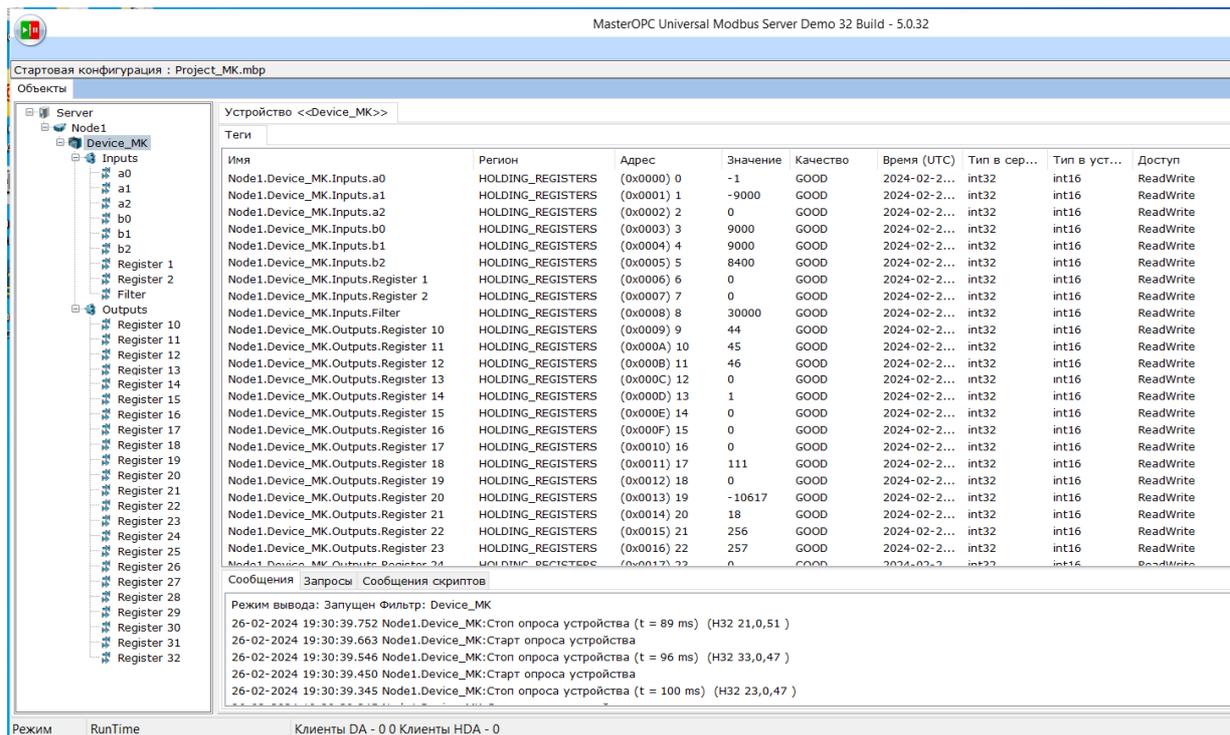


Рис. 8. Алгоритм ввода-вывода данных имитатора
Fig. 8. Simulator data input-output algorithm

Временные конфигурационные параметры: скорость передачи данных по COM-порту 9600 бод; контроль четности четный, стоп-бит; период опроса 20 мс; повторы при ошибке подключения 3; повторы при ошибке записи 3; сброс команд при разрыве соединения; повторное соединение после ошибки через 10 с; период опроса после ошибки 10 мс; задержка опроса после получения ответа 20 мс. Считанные данные из регистров с 10-го по 32-й представлены на рис. 9.

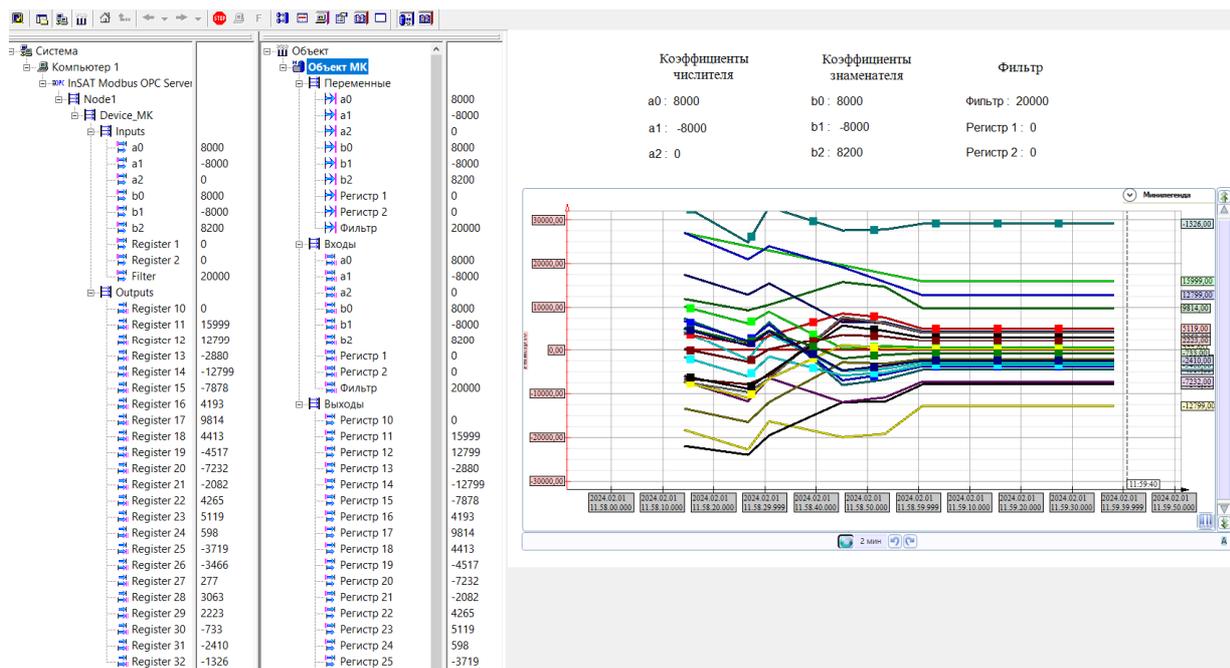


Рис. 9. Чтение данных из регистров 10–32
Fig. 9. Read data from registers 10–32

Время работы программы, включающей 32 регистра, из которых 13 регистров задают параметры для настройки состояния следящего гидропривода, следующие 19 регистров считывают данные состояния и подключения ЭБУ, составило 0,48 с. Это в полной мере отвечает требованиям к разработке программного комплекса для обеспечения мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими.

Выводы

На основе анализа взаимодействия аппаратной и программной части диагностического стенда разработана архитектура цифрового двойника системы управления вибростенда для испытания цифровых трансформаторов. Разработанная архитектура цифрового двойника системы управления ориентирована на обеспечение автоматизированной работы испытательного стенда в различных технологических режимах в условиях воздействий помех и окружающей среды. Применение технологии цифровых двойников для распараллеливания процесса разработки аппаратуры и программного обеспечения значительно повышает эффективность работы.

Анализ вариантов реализации цифрового двойника показал, что применение универсальных SCADA-систем упрощает процесс разработки. При разработке цифрового двойника использование универсальной SCADA-системы обосновано. Результаты проведенного анализа указывают на преимущества создания цифрового двойника системы управления вибростенда на основе MasterSCADA.

Проверка адекватности взаимодействия цифрового двойника системы управления испытательного стенда с компонентами испытательного стенда проведена путем проведения имитационного моделирования. Целью имитационного моделирования являлось изучение состояния регистров ЭБУ в процессе выполнения технологических операций. Прототипирование системы управления испытательного стенда выполнено средствами универсальной отечественной SCADA-системы MasterSCADA. Разработан OPC-сервер для обмена данными с микроконтроллером семейства STM32 в приложении Modbus Universal MasterOPC и проект в системе MasterSCADA. Тестирование программы показало полную работоспособность разработанного проекта.

Список литературы

1. Проблемы развития цифровой энергетики в России / Н.И. Воропай, М.В. Губко, С.П. Ковалев и др. // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2–14. DOI: 10.25728/pu.2019.1.1
2. Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 9–27. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9
3. Теория и практика применения цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения / В.Д. Лебедев, Н.В. Кузьмина, Д.Г. Григорьев и др. // Релейщик. 2023. № 1 (45). С. 42–49.
4. Коновалов Ю.В., Леб М.С., Потапов И.Н. Замена аналоговых трансформаторов тока и напряжения на цифровые // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2023. № 17. С. 35–38.
5. Разработка программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде / О.В. Логиновский, Г.И. Волович, Д.В. Топольский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 19–31. DOI: 10.14529/ctcr240102
6. Результаты развития проектов Уральского НОЦ обсудили на конференции // ЮУрГУ: сайт. URL: <https://www.susu.ru/ru/news/2024/02/19/rezultaty-razvitiya-proektov-uralskogo-noc-obsudili-na-konferencii> (дата обращения: 17.06.2024).
7. Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 8. С. 124–133. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133
8. Сысоева Е.А. Национальный стандарт Российской Федерации в области цифровых двойников // Компетентность. 2022. № 3. С. 10–13. DOI: 10.24412/1993-8780-2022-3-10-13
9. Петров А.В. К вопросу автоматизации построения имитационных моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 9. С. 101–110. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-101-110
10. Орысюк Д.А., Коновалова В.С. Аспекты применения цифровых двойников изделий // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2023. № 1. С. 385–386.
11. Петракова К.В., Зазулина А.Б., Лутков А.Н. Стенд для тестирования специализированных цифровых вычислительных устройств // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2012. № 4. С. 75–80.
12. Миронов Д.А., Ламм А.К., Расулов Р.К. Обзор программных продуктов разработки цифровых двойников // Вестник Национального института бизнеса. 2022. № 4 (48). С. 12–27.
13. Деменков Н.П. SCADA-системы как инструмент проектирования АСУ ТП. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 328 с.
14. Руководство пользователя Trace Mode 5.0. М.: Фирма Adastra, 2003. 909 с.
15. Тугов В.В., Сергеев А.И., Шаров Н.С. Проектирование автоматизированных систем управления в TRACE MODE: учеб. пособие. Оренбург: ОГУ, 2017. 307 с.

References

1. Voropai N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P. et al. [Problems of development of digital energy in Russia]. *Control Sciences*. 2019;(1):2–14. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2019.1.1
2. Loskutov A.B. [Problems of the transition of the electric power industry to digital technologies]. *Smart Electrical Engineering*. 2018;(1):9–27. (In Russ) DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9
3. Lebedev V.D., Kuzmina N.V., Grigoriev D.G. et al. [Theory and practice of using digital measuring current and voltage transformers]. *Relayman*. 2023;1(45):42–49. (In Russ)
4. Konovalov Yu.V., Leb M.S., Potapov I.N. Replacement of analog current and voltage transformers to digital. *Bulletin of Angarsk State Technical University*. 2023;(17):35–38. (In Russ)
5. Loginovskiy O.V., Volovich G.I., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliakov A.E. Development of a software package for testing digital instrument transformers on a vibration stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):19–31. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240102
6. [The results of the development of the Ural Scientific and Educational Center projects were discussed at the conference (2024)]. *SUSU: website*. (In Russ.) Available at: <https://www.susu.ru/ru/news/2024/02/19/rezultaty-razvitiya-proektov-uralskogo-noc-obsudili-na-konferencii> (accessed 17 June 2024).

7. Korovin G.B. The opportunities for using digital twins in industry. *Transbaikal state university journal*. 2021;27(8):124–133. (In Russ.) DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133
8. Sysoeva E.A. Sysoeva E.A. The world's first national standard of the Russian Federation in the field of digital twins is adopted. *Competency (Russia)*. 2022;(3):10–13. (In Russ.) DOI: 10.24412/1993-8780-2022-3-10-13
9. Petrov A.V. To the problem of simulation modeling automation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(9):101–110. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-101-110
10. Orysyuk D.A., Konovalova V.S. [Aspects of the application of digital twins of products]. *Molodye uchenye – razvitiyu Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy (POISK)* [Young scientists – for the development of the National Technological Initiative (POISK)]. 2023;(1):385–386. (In Russ.)
11. Petrakova K.V., Zazulina A.B., Lutkov A.N. [Test stand for specialized digital computing devices]. *Information technology of CAD/CAM/CAE*. 2012;(4):75–80. (In Russ.)
12. Mironov D.A., Lamm A.K., Rasulov R.K. Overview of software products for the development of digital twins. *Bulletin of the National Institute of Business*. 2022;4(48):12–27. (In Russ.)
13. Demenkov N.P. *SCADA-sistemy kak instrument proektirovaniya ASU TP* [SCADA systems as a tool for designing automated process control systems]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2004. 328 p. (In Russ.)
14. *Rukovodstvo pol'zovatelya Trace Mode 5.0* [User Manual Trace Mode 5.0]. Moscow: Adastra; 2003. 909 p. (In Russ.)
15. Tugov V.V., Sergeev A.I., Sharov N.S. *Proektirovanie avtomatizirovannykh sistem upravleniya v TRACE MODE: uchebnoe posobie* [Design of automated control systems in TRACE MODE. Tutorial]. Orenburg: Orenburg State University Publ.; 2017. 307 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskii@susu.ru.

Топольский Дмитрий Валерианович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiidv@susu.ru.

Топольский Никита Дмитриевич, аспирант кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiind@susu.ru.

Беляков Александр Евгеньевич, старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alex.beliakov@susu.ru.

Белякова Вероника Алексеевна, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; pochinskaiava@susu.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskii@susu.ru.

Dmitrii V. Topolskii, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiidv@susu.ru.

Nikita D. Topolskii, Postgraduate student of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiind@susu.ru.

Alexander E. Beliakov, Senior Lecturer of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; alex.beliakov@susu.ru.

Veronica A. Beliakova, Postgraduate student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; pochinskaiava@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024

The article was submitted 19.06.2024