

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ВИБРОСТЕНДЕ

О.В. Логиновский<sup>1</sup>, [loginovskiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiov@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

Г.И. Волович<sup>2</sup>, [g\\_volovich@mail.ru](mailto:g_volovich@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

Д.В. Топольский<sup>1</sup>, [topolskiidv@susu.ru](mailto:topolskiidv@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

Н.Д. Топольский<sup>1</sup>, [topolskiind@susu.ru](mailto:topolskiind@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

А.Е. Беляков<sup>1</sup>, [alex.beliakov@susu.ru](mailto:alex.beliakov@susu.ru), <https://orcid.org/0009-0004-7823-3071>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

**Аннотация.** В представленной работе рассматривается программный комплекс для обеспечения мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими в составе диагностического вибростенда для цифровых трансформаторов. Срок службы цифровых измерительных трансформаторов составляет 25 лет, а межповерочный интервал – 8 лет. Для достижения таких высоких эксплуатационных характеристик необходимо проведение большого количества испытаний для подобных изделий. Одним из таких испытаний является испытание на вибростенде. Уникальность применяемого в диагностическом вибростенде гидропривода заключается в его длительном ресурсе работоспособности в эксплуатационных нагрузках (до 100 млн циклов). Такая надежность достигается за счет применения в конструкции гидропривода специальных гидростатических направляющих и требует наличия специального программного обеспечения. Создана архитектура программного комплекса для вибростенда. Для тестирования функционала пакета выполнено имитационное моделирование работы компонентов программного комплекса. **Цель исследования:** на основе анализа функционирования технологического оборудования и вариантов реализации управляющего программного обеспечения разработать архитектуру программного комплекса для реализации системы мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими в составе диагностического вибростенда для цифровых трансформаторов. **Материалы и методы.** Поставленные научные задачи решены с применением методов системного анализа, компьютерного, математического и имитационного моделирования взаимодействия программного комплекса с компонентами следящего гидропривода с гидростатическими направляющими. **Результаты.** Основным практическим результатом проведенных исследований является разработка архитектуры программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде. Предлагается при программной реализации комплекса использовать кроссплатформенные решения и опираться на современный опыт использования свободно распространяемого программного обеспечения. **Заключение.** Разработанная архитектура программного комплекса ориентирована на обеспечение автоматизированной работы следящих гидроприводов, позволяет конфигурировать все необходимые параметры оборудования, осуществлять мониторинг состояния оборудования по цифровым протоколам передачи данных, централизованно сохранять и тиражировать настройки гидроприводов под конкретные условия эксплуатации на предприятиях. Анализ вариантов реализации показал, что применение SCADA-систем упрощает процесс разработки типовых проектов диспетчерского управления и сбора данных и мониторинга состояния, но при этом имеет повышенную сложность на этапе развертывания и эксплуатации. Функционал ни одной из распространённых и надёжных SCADA-систем не покрывает всех требований к данному проекту. В частности, это относится к подключению по USB и обработке высокочастотных сигналов, предусмотренных требованиями к разработке. Помимо этого, при применении универсальных SCADA-систем конечному пользователю необходимо приобрести лицензию на RunTime компонент SCADA.

**Ключевые слова:** цифровой измерительный трансформатор, мониторинг состояния, вибростенд, следящий гидропривод с гидростатическими направляющими, 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 производственные 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 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

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr240102

## DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR TESTING DIGITAL INSTRUMENT TRANSFORMERS ON A VIBRATION STAND

**O.V. Loginovskiy**<sup>1</sup>, [loginovskiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiov@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

**G.I. Volovich**<sup>2</sup>, [g\\_volovich@mail.ru](mailto:g_volovich@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

**D.V. Topolskii**<sup>1</sup>, [topolskiidv@susu.ru](mailto:topolskiidv@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

**N.D. Topolskii**<sup>1</sup>, [topolskiind@susu.ru](mailto:topolskiind@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

**A.E. Beliakov**<sup>1</sup>, [alex.beliakov@susu.ru](mailto:alex.beliakov@susu.ru), <https://orcid.org/0009-0004-7823-3071>

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The presented work examines a software package for monitoring the condition of a hydraulic servo drive with hydrostatic guides as part of a diagnostic vibration stand for digital transformers. The service life of digital instrument transformers is 25 years, and the calibration interval is 8 years. To achieve such high performance characteristics, it is necessary to conduct a large number of tests for such products. One such test is the vibration test. The uniqueness of the hydraulic drive used in the diagnostic vibration stand lies in its long service life under operational loads (up to 100 million cycles). This reliability is achieved with special hydrostatic guides in the hydraulic drive design and requires special software. The architecture of the software complex for the vibration stand has been created. To test the functionality of the package, simulation modeling of the operation of the components of the software package was performed. **Aim.** Based on the analysis of the functioning of technological equipment and options for implementing control software, develop the architecture of a software package for implementing a system for condition monitoring of a servo hydraulic drive with hydrostatic guides as part of a diagnostic vibration stand for digital transformers. **Materials and methods.** The stated scientific problems were solved using methods of system analysis, computer, mathematical and simulation modeling of the interaction of the software complex with the components of the servo hydraulic drive with hydrostatic guides. **Results.** The main practical result of the research is the development of the architecture of a software package for testing digital instrument transformers on a vibration stand. It is proposed to use cross-platform solutions when implementing the complex software and rely on modern experience in using freely distributed software. **Conclusion.** The developed architecture of the software package is focused on ensuring the automated operation of servo hydraulic drives, allows you to configure all the necessary equipment parameters, monitor the condition of the equipment using digital data transfer protocols, centrally save and replicate hydraulic drive settings for specific operating conditions on the enterprises. Analysis of implementation options showed that the use of a SCADA system simplifies the process of developing standard projects for dispatch control and data collection and condition monitoring, but at the same time, it has increased complexity at the stage of deployment and operation. The functionality of none of the widespread and reliable SCADA systems covers all the requirements for this project. This particularly applies to USB connectivity and high frequency signal processing required by design requirements. In addition, when using universal SCADA systems, the end user must purchase a license for the RunTime SCADA component.

**Keywords:** digital instrument transformer, condition monitoring, vibration stand, hydraulic servo drive with hydrostatic guides, simulation modeling

**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., 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

## Введение

В связи с растущим глобальным интересом к разработке будущих интеллектуальных сетей большое внимание уделяется нетрадиционным измерительным трансформаторам (ИТ). В отличие от классического трансформатора тока с магнитным сердечником, электронный трансформатор тока не имеет насыщения, имеет небольшой объем и может генерировать цифровой сигнал, соответствующий новейшим протоколам цифровой связи, таким как IEC61850. Традиционные ИТ являются весьма совершенными устройствами, однако имеют по сравнению с электронными (цифровыми) ИТ и целый ряд других недостатков, таких как значительные массогабаритные характеристики, опасность возникновения пожара и взрыва. Цифровые ИТ должны прийти на замену традиционным электромагнитным трансформаторам, которые находятся в эксплуатации. Стоимость оборудования измерительных комплексов токов и напряжения, затраты на монтаж, транспортирование и эксплуатацию при использовании комбинированных цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения значительно ниже, чем при использовании традиционных ИТ.

В исследовании рассматривается программный комплекс для обеспечения мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими в составе диагностического вибростенда для цифровых трансформаторов. Программный комплекс предназначен для управления, наладки и диагностики параметров исполнительных механизмов следящего гидропривода с гидростатическими направляющими. Целью создания программного комплекса является обеспечение автоматизированной работы следящего гидропривода в составе диагностического стенда в режиме реального времени. Задание частоты воздействия на объект испытания осуществляется путем передачи энергии от насосной установки через специализированную платформу посредством обработки сигналов, получаемых от системы управления.

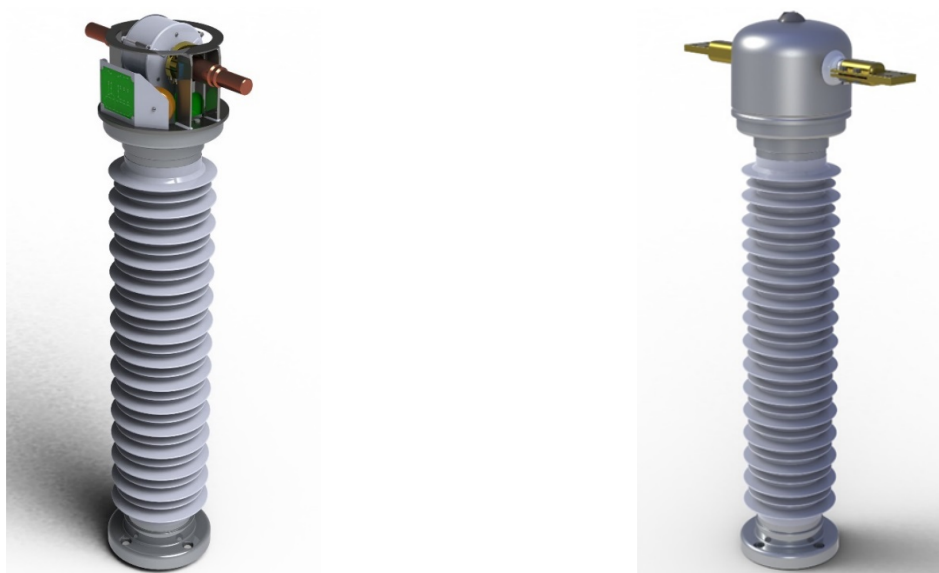


Рис. 1. Цифровой измерительный трансформатор TRATON-110  
Fig. 1. Digital instrument transformer TRATON-110

Объектом испытания является цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения (ЦКТТН). ЦКТТН разработан компанией «Челэнергоприбор» (рис. 1). Трансформатор пред-

назначен для высокоточных измерений переменного тока и напряжения для классов напряжений 110–220 кВ с диапазоном измерений тока 300–2000 А, класса точности 0,2S по току и 0,2 по напряжению. Срок службы таких трансформаторов составляет не менее 25 лет, а межповерочный составляет интервал 8 лет. По этой причине подобному оборудованию помимо опытной эксплуатации [1] требуются еще и испытания на эксплуатационную надежность, для которых применяются вибростенды [2].

Применяемый в диагностическом стенде гидропривод обладает ресурсом работоспособности в эксплуатационных нагрузках до 100 млн циклов. Подобная работоспособность достигается за счет применения специальных гидростатических направляющих в конструкции гидропривода.

### 1. Постановка задач

Следящие гидроприводы с гидростатическими направляющими применяются в испытательных стендах – обеспечивают нагрузку на объект испытания [3–6]. На испытательных стендах изделия, конструкции и материалы проходят проверку на прочность в условиях, близких к эксплуатационным [7, 8]. До 2021 года следящий гидропривод был на 100 % импортного производства. В каждом стенде количество гидроприводов варьируется от 2 до 16, что объясняет высокую долю стоимости гидроприводов импортного изготовления относительно общей стоимости стенда, изготовленного в условиях Уральского инжинирингового центра (УРИЦ) [9]. В качестве исходного импортного образца были взяты гидроприводы японской компании Yuken [10]. Недостатком японского оборудования, находящегося в УРИЦ, является аналоговое управление, поэтому для удобства коммуникации между следящими гидроприводами и программным комплексом разрабатываются цифровые интерфейсы передачи данных по USB и Ethernet в режиме SRT (Soft-Real-Time) [11].

В состав диагностического вибростенда (рис. 2) входит следящий гидропривод, включающий 3 компонента: гидроцилиндр с гидростатическими направляющими (ГП с ГСН), электрогидравлический усилитель мощности (ЭГУМ), датчик положения (ДП), стендовое испытательное оборудование, платформа, на которой располагается объект испытаний (ЦКТН), а также персональный компьютер (ПК), на котором базируется программный для обеспечения мониторинга состояния гидропривода с гидростатическими направляющими.

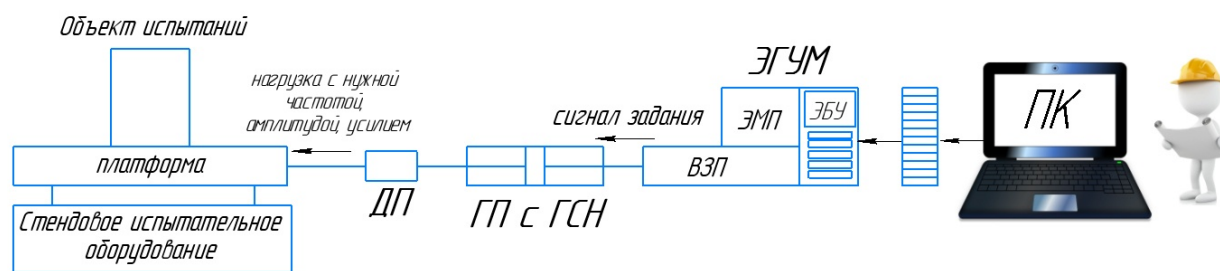


Рис. 2. Состав диагностического вибростенда  
Fig. 2. The composition of the diagnostic vibration stand

Цифровая передача данных между следящим гидроприводом и программным комплексом в режиме SRT обеспечивает оперативный мониторинг текущего состояния отдельных параметров оборудования с частотой от единиц до десятков герц. Режим SRT не позволяет в реальном времени считывать данные осциллограмм с отсчетами в микросекунды, поэтому в программный комплекс заложены алгоритмы пакетной передачи данных.

Разрабатываемый в проекте ЭГУМ включает электронный блок управления (ЭБУ) на базе микроконтроллера STM32 или его аналога со встроенной поддержкой USB и двумя Ethernet через плату-преобразователь (Ethernet в RS-485). Также в состав ЭГУМ входит высокочастотная золотниковая пара (ВЭП), соединенная с электромеханическим преобразователем (ЭМП). Протоколом взаимодействия ЭБУ с программным комплектом является Modbus RTU и Modbus TCP, удовлетворяющие режиму SRT.

Программный комплекс осуществляет мониторинг состояния ГП с ГСН посредством подключения к ДП и ЭГУМ по USB (виртуальный COM-порт, протокол Modbus RTU) и Ethernet (протокол Modbus TCP). IP-адрес оборудования возможно задать в настройках программы. По Modbus реализуется функционал считывания и записи параметров оборудования, а также пакетный режим сбора измеренных показаний для визуализации в виде графиков в модуле. Программа автоматически при запуске определяет тип оборудования с подстройкой интерфейса под него.

Программный комплекс включает модуль с графическим интерфейсом, устанавливаемый на рабочее место оператора и облачную систему хранения собранных с приборов данных (рис. 3).

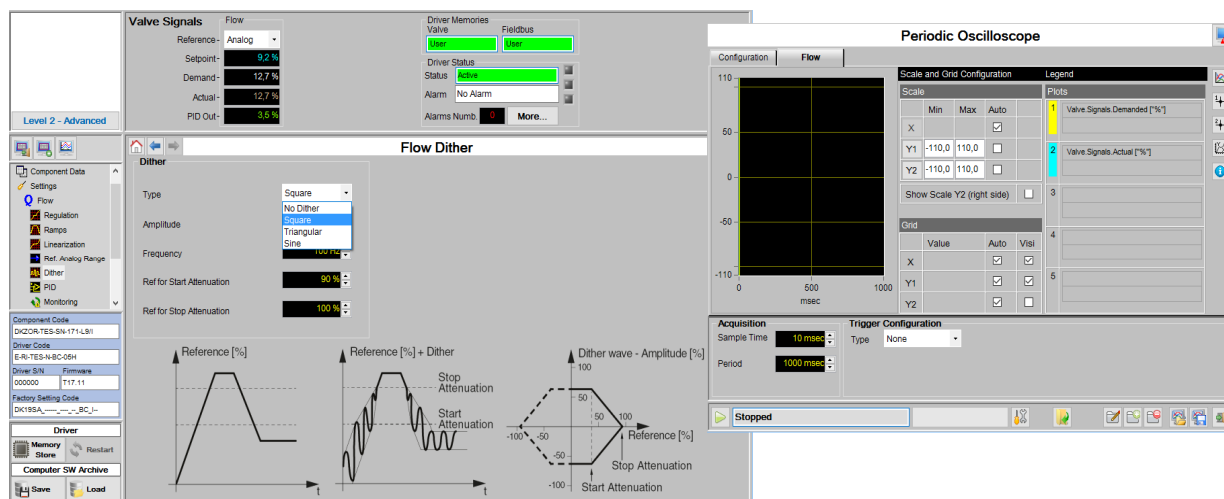


Рис. 3. Интерфейс модуля конфигурирования и мониторинга гидропривода  
Fig. 3. Interface of the hydraulic drive configuration and monitoring module

Программный комплекс выполняет функции управления, наладки и диагностики параметров исполнительных механизмов следящего гидропривода с гидростатическими направляющими для обеспечения его автоматизированной работы в режиме, близком к реальному времени. Программный комплекс должен быть совместим с компонентами гидроприводов, производством которых занимается УриЦ. Важным аспектом программного комплекса является кроссплатформенность и возможность работы на отечественных операционных системах (ОС). Поддержка модели SaaS (software as a service) позволяет перенести с предприятия все модули, кроме модуля взаимодействия с ЭГУМ (по USB и Ethernet), в локальное или удаленное облако, техническое обслуживание которого может выполнять поставщик программного обеспечения. При разработке программного комплекса должен использоваться язык программирования высокого уровня: C, C++, PASCAL, PHP, Python – определяется в процессе разработки.

## 2. Обоснование выбора пути решения задач проекта по созданию программного комплекса

При реализации систем мониторинга состояния всегда возникает проблема выбора вариантов реализации программной части. Проблема заключается в обоснованном выборе между созданием проекта в универсальной SCADA-системе и разработкой нового проприетарного программного обеспечения (ПО) от производителя оборудования.

Для обоснованного выбора варианта инструментального ПО необходимо рассмотреть критерии, относящиеся не только к этапу разработки, но и то, какой пользовательский опыт будет давать в результате полученное прикладное ПО. Сравнение вариантов применения универсальных SCADA-систем и написания полностью новой программы на языке программирования общего назначения применительно к задаче разработки программного комплекса для мониторинга состояния следящего гидропривода приведено в таблице.

Анализ вариантов реализации программного комплекса

Table

Analysis of software package implementation options

№ п/п	Критерий анализа	Проект в универсальной SCADA	Разработка нового собственного ПО	Новое ПО
1	Простота использования среды программирования	В основном интерфейс drag-and-drop с возможностью написания сценариев	Требуется знание языка программирования общего назначения	Нет
2	Кривая обучения	Пользователи с опытом работы со SCADA могут найти его более простым в использовании	Крутая кривая обучения для тех, кто не знаком с программированием на языке программирования общего назначения	Нет
3	Формат поставки	Как правило, RunTime-компонент SCADA и прикладное ПО для запуска на нём поставляется отдельными дистрибутивами	Поставляется одним дистрибутивом	Да
4	Развертывание	Развертывание требует более сложной установки, включая установку RunTime-компонента SCADA, копирования проекта прикладной программы, настройку сетевых соединений и серверов	Развертывание с помощью инсталлятора, а также возможна переносимая версия, не требующая установки	Да
5	Лицензирование	Требуется лицензия на RunTime-компонент SCADA	Лицензия на стороннее ПО не требуется	Да
6	Формат лицензирования	Как правило, USB-ключ или привязка к аппаратной конфигурации ПК	Дополнительных лицензий не требуется, нет никаких ограничений в использовании	Да
7	Соблюдение принципов SAAS-технологий	Существуют клиент-серверные SCADA, при этом, как правило, предполагается размещение клиента и сервера на разных компьютерах	Отдельную программу можно сделать по клиент-серверной архитектуре. Например, таким образом, чтобы сервером выступал сам ЭГУМ	Да
8	Гибкость	Ограниченные возможности настройки и управления из-за предварительно созданного пользовательского интерфейса с фиксированной функциональностью	Обеспечивает максимальную гибкость в плане настройки и возможностей управления	Да
9	Обработка высокочастотных сигналов	Штатно не поддерживается, требуется написание дополнительного компонента	Высокая гибкость в реализации, поскольку есть доступ к низкоуровневым функциям системы	Да
10	Совместимость с аппаратным обеспечением	Не поддерживает USB. Интерфейс USB для сервисной настройки ЭГУМ предпочтительнее, чем RS-485, как более современный и доступный на ПК	Поддерживает USB	Да
11	Самодиагностика	Частичная, для полного соответствия требованиям нужно разрабатывать дополнительные компоненты	Высокая гибкость в реализации, можно полностью выполнить требования	Да

Окончание таблицы  
Table (end)

№ п/п	Критерий анализа	Проект в универсальной SCADA	Разработка нового собственного ПО	Новое ПО
12	Совместимость с ОС и другим ПО	Низкая. Прикладная программа получается привязанной к конкретной версии SCADA, которая, в свою очередь, выпускается под конкретную версию ОС. Также нередки случаи конфликта SCADA разных производителей	Возможность сделать кросс-платформенное ПО с минимумом зависимостей и конфликтов	Да
13	Используемые языки программирования	В распространённых и надёжных SCADA не поддерживается ни один из перечисленных в требованиях к разработке	Высокая гибкость в реализации, можно полностью выполнить требования	Да
14	Реализация аналогичных систем	Нет примеров на рынке следящих приводов	Производители следящих приводов используют данный подход	Да
15	Защита от копирования и информационная безопасность	Низкая, поскольку имеется необходимость передавать пользователю файлы из проекта прикладной программы	Высокая в силу того, что итоговая программа может быть скомпилирована и зашифрована	Да
16	Применимость для пусконаладочных работ	Низкая, так как высока сложность установки и подключения, а также вероятны конфликты с другими SCADA, установленными на инженерной станции	Зависит от реализации. У большинства аналогов – хорошая применимость в полевых условиях работы	Да

Результаты проведенного анализа указывают на преимущества создания нового проприетарного ПО при программной реализации программного комплекса для мониторинга состояния следящего гидропривода. В соответствии с выбором данного варианта реализации программного комплекса вытекают нижеприведенные решения по определению технических требований к средствам создания ПО.

Кроссплатформенность модуля сбора данных, его локальная установка на компьютер, непосредственно подключенный к ЭГУМ, достаточная для работы SRT производительность, простота установки накладывают ограничения на выбор технологий разработки ПО и, как следствие, архитектуру программного комплекса.

Собранные программным модулем данные хранятся на сервере (облаке) в реляционной базе данных (БД). Поддерживается автономная работа модуля с ранее сохраненными данными без подключения к оборудованию. Также в БД сохраняются журналы событий (лог-файлы) работы программы и журналы событий программных и аппаратных ошибок с возможностью просмотра из программы. Данные осциллограмм в виде массива точек для экономии ресурсов и места в БД хранятся в BLOB-полях.

Дистрибутив программного комплекса получает уникальный идентификационный номер. Разрабатываемый генератор номеров может осуществлять привязку номера к уникальным аппаратным параметрам оборудования (например, микроконтроллер ЭГУМ).

Поддерживаемые ОС программного модуля и серверной системы управления базами данных: Windows 10 и выше, Linux Debian 10 и выше, Astra Linux 1.7.3 и выше.

Система управления базами данных: PostgreSQL 15. Данная СУБД характеризуется высокой скоростью работы, поддержкой разнообразных видов индексов, репликации и JSON. Также в сетевую часть комплекса можно заложить горизонтальное масштабирование по собранным данным, не имеющим ограничения ссылочной целостности. Зачастую именно БД – узкое место производительности системы, поэтому масштабирование решает эту проблему.



Язык разработки: C#, платформа .NET 7 [12]. Среда разработки: JetBrains Rider, основная библиотека графических компонент: Avalonia UI [13], фреймворк GUI – Model-View-ViewModel [14].

Дополнительные программные библиотеки, такие как Modbus [15], графопостроитель, разрабатываются частично самостоятельно в рамках программного комплекса, элементы библиотек берутся из свободных источников (репозиториях) с открытым исходным кодом.

Всё программное обеспечение, необходимое для функционирования программного комплекса, – свободное.

Инсталлятор комплекса устанавливает все необходимое ПО со всеми зависимостями. Установленный на компьютер оператора гидропривода программный модуль не должен конфликтовать с другим установленным программным обеспечением.

### 3. Имитационное моделирование взаимодействия программного комплекса с компонентами вибростенда

Проверка адекватности взаимодействия разрабатываемого программного комплекса с компонентами следящего гидропривода выполнена путем проведения имитационного моделирования. Для этих целей разработан и протестирован программный модуль взаимодействия с ЭБУ, а также была разработана плата-имитатор ЭБУ с микроконтроллером STM32 [16], подключенная по USB (виртуальный COM-порт) к компьютеру (рис. 4).

Адресное пространство ЭБУ включает 65 535 16-битных регистров Modbus. Старшая половина адресов с 32 768 до 65 535 отводится на буфер осциллограммы, содержащей точки графика с микросекундными интервалами измерений, считывание происходит полным диапазоном. Доступ к другим параметрам осуществляется через отдельные регистры.

Целью имитационного моделирования являлась оценка скорости считывания и записи отдельных параметров, а также пакетный режим считывания точек графиков, характеризующих состояние следящего гидропривода с гидростатическими направляющими. Плата реализует вычисление биквадратного фильтра. При моделировании были задействованы функции 3 (Read Multiple Registers) и 6 (Write Single Register).

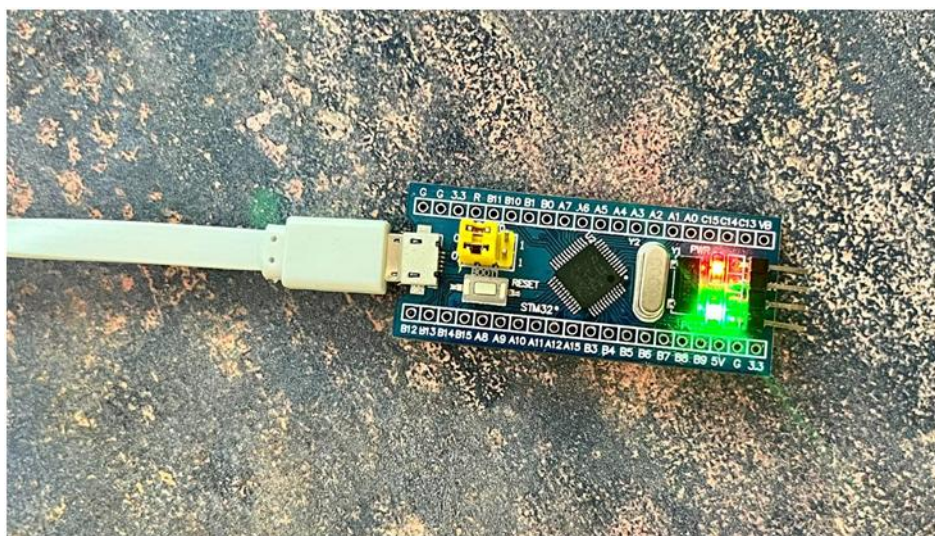


Рис. 4. Плата-имитатор ЭБУ  
Fig. 4. Electronic control unit signal simulator

Modbus-регистры доступны для чтения и записи по адресам, начиная с нулевого:

- регистры с 0-го по 5-й содержат коэффициенты числителя ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ) и знаменателя ( $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ) биквадратного фильтра, умноженные на 10000 с округлением до целого 16-битного значения;
- регистры 6, 7 содержат начальные значения двух регистров задержки фильтра;
- регистр 8 содержит значение на входе фильтра.

При записи любого из этих регистров микроконтроллер пересчитывает переходный процесс на выходе фильтра и записывает его по адресам 10–124 (рис. 5).



	Alias	00000	Alias	00020	Alias	00040	Alias	00060	Alias	00080	Alias	00100	Alias	00120
0	A0	10000		-14939		-1498		185		79		8		0
1	A1	-10000		-8207		899		414		47		-4		-2
2	A2	0		4341		2158		258		-19		-11		-1
3	B0	10000		11235		1402		-89		-59		-7		0
4	B1	-10000		7589		-410		-306		-43		1		1
5	B2	8400		-1848		-1588		-231		6		8		
6	Z1	0		-8223		-1244		25		42		6		
7	Z2	0		-6670		90		220		37		0		
8	INPUT	30000		237		1135		198		1		-5		
9		0		5840		1059		13		-29		-5		
10		30000		5641		105		-153		-31		0		
11		30000		735		-784		-164		-5		3		
12		4800		-4003		-873		-35		20		4		
13		-20400		-4621		-214		102		25		1		
14		-24432		-1258		519		132		8		-2		
15		-7296		2623		699		46		-12		-3		
16		13226		3680		263		-64		-19		-1		
17		19355		1476		-324		-103		-8		1		
18		8244		-1614		-545		-49		7		2		
19		-8013		-2855		-272		37		15		1		

Рис. 5. Карта регистров  
Fig. 5. Map of registers

Пример установленных параметров, содержащихся в регистрах с 0-го по 8-й:

$a_0 = 1,00$ ;  $a_1 = -1,00$ ;  $a_2 = 0,00$ ;

$b_0 = 1,00$ ;  $b_1 = -1,00$ ;  $b_2 = 0,84$ ;

$z_1 = 0,00$ ;  $z_2 = 0,00$ ;  $in = 3,00$ .

Считанные данные из регистров с 10-го по 124-й представлены на рис. 6.

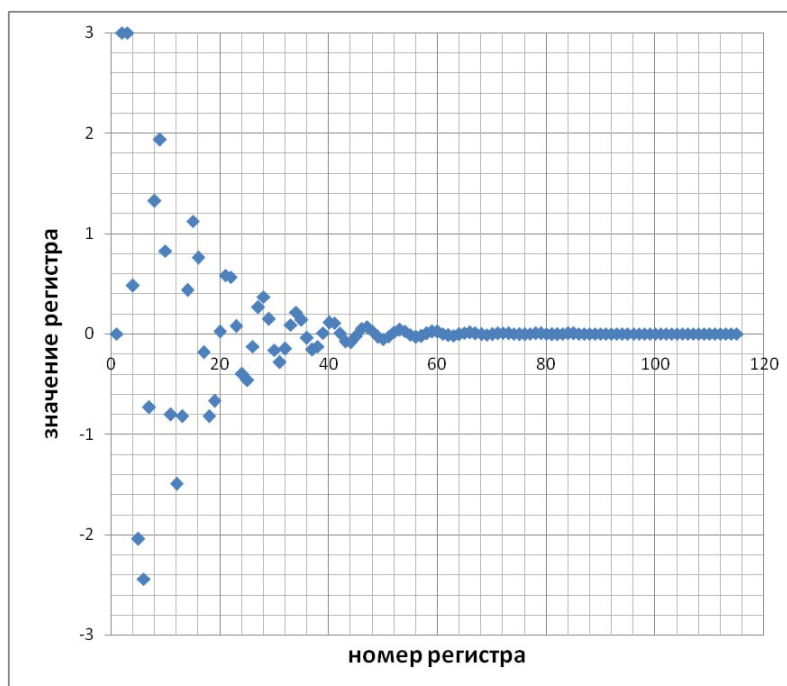


Рис. 6. Считанные данные из регистров 10–124  
Fig. 6. Read data from registers number 10 to 124

Временные конфигурационные параметры: скорость передачи данных по com-порту 115 200 бит/с; пауза перед операцией чтения 20 мс, пауза перед операцией записи 50 мс.

Исходный код на C# алгоритма ввода-вывода данных имитатора (рис. 7).

```
client.PortName = "COM3";
client.BaudRate = 115200;
client.ReadPause = 20;
client.WritePause = 50;

const double input = 3;
client.WriteSingleRegister(1, 8, (ushort) (short) (input*10000));

double[] parms = client.ReadHoldingRegisters(1, 0, 9)
    .Select(p => ((short) p)/10000.0)
    .ToArray();

Console.WriteLine($"a0={parms[0],5:F2}; a1={parms[1],5:F2}; a2={parms[2],5:F2}");
Console.WriteLine($"b0={parms[3],5:F2}; b1={parms[4],5:F2}; b2={parms[5],5:F2}");
Console.WriteLine($"z1={parms[6],5:F2}; z2={parms[7],5:F2}; in={parms[8],5:F2}");

double[] values = client.ReadHoldingRegisters(1, 9, 115)
    .Select(p => ((short) p)/10000.0)
    .ToArray();
```

Рис. 7. Алгоритм ввода-вывода данных имитатора  
Fig. 7. Data input-output algorithm of the Electronic control unit signal simulator

Время работы программы, включающей алгоритмы записи одного параметра, пересчета фильтра, считывания параметров и графика, составило 0,14 с. Время только считывания пакета координат – 0,04 с, примерно равно времени считывания 9 регистров. Пакет координат можно считывать 30 раз в секунду. Это в полной мере отвечает требованиям к разработке программного комплекса для обеспечения мониторинга состояния следящего гидропривода с гидростатическими направляющими.

### Выводы

На основе анализа функционирования технологического оборудования и управляющего программного обеспечения создана архитектура программного комплекса для следящего гидропривода с гидростатическими направляющими в составе вибростендов для испытания цифровых трансформаторов. Разработанная архитектура программного комплекса ориентирована на обеспечение автоматизированной работы следящих гидроприводов, позволяет конфигурировать все необходимые параметры оборудования, осуществлять мониторинг состояния оборудования по цифровым протоколам передачи данных, централизованно сохранять и тиражировать настройки гидроприводов под конкретные условия эксплуатации на предприятиях.

Анализ вариантов реализации показал, что применение SCADA-систем упрощает процесс разработки типовых проектов диспетчерского управления и сбора данных и мониторинга состояния, но при этом имеет повышенную сложность на этапе развертывания и эксплуатации. Функционал ни одной из распространенных и надёжных SCADA-систем не покрывает всех требований к данному проекту. В частности, это относится к подключению по USB и обработке высокочастотных сигналов, предусмотренных требованиями к разработке. Помимо этого, при применении универсальных SCADA-систем конечному пользователю необходимо приобретать лицензию на RunTime-компонент SCADA. Таким образом, качественное и полностью соответствующее требуемому функционалу прикладное ПО реализовать на основе универсальных SCADA-систем не представляется возможным либо это потребует разработки дополнительных компонентов на языке программирования общего назначения.

Тестирование функционала пакета, выполненное методом имитационного моделирования на основе создания платы-имитатора ЭБУ, показало надежное взаимодействие компонентов программного комплекса с оборудованием вибростенда. Временные задержки на обмен и обработку технологической информации мониторинга состояния соответствуют требованиям к разработке программного комплекса.

### Список литературы

1. Volovich G.I., Kirpichnikova I.M., Topolskiy D.V. Experimental operation of the adaptive electronic instrument transformer of current and voltage // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg, Russia, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076216
2. A New Vibration Testing Platform for Electronic Current Transformers / Z. Li et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68, no. 3. P. 704–712. DOI: 10.1109/TIM.2018.2854939
3. Анализ перспективы развития мехатронных систем на примере электрогидроцилиндра повышенной эффективности / А.Е. Карамгужинова, В.Н. Кузнецова, В.В. Савинкин, Д.А. Коптяев // Вестник СибАДИ. 2020. № 17 (1). С. 22–31. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31
4. Пашков Е.В., Крамарь В.А., Кабанов А.А. Следящие приводы промышленного технологического оборудования: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 368 с.
5. Проектирование автоматизированных станков и комплексов: учеб.: в 2 т. / [В.М. Утенков и др.]; под ред. П.М. Чернянского. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. Т. 1. 331 с.
6. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справ. М.: Машиностроение, 2008. 640 с.
7. Зеленко О.В., Егорычев А.И. Программная реализация протокола ModBus на основе электронного модуля ввода-вывода // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmная-realizatsiya-protokola-modbus-na-osnove-elektronno-go-modulya-vvoda-vyvoda> (дата обращения: 16.12.2023).
8. Ефимова Ю.В. Автоматизированная система визуализации с передачей параметров по протоколу MODBUS // Форум молодых ученых. 2018. № 12-2 (28). С. 512–521.
9. Проект ЮУрГУ по производству следящих гидроприводов получил федеральную поддержку // Южно-Уральский государственный университет: сайт. URL: <https://www.susu.ru/ru/news/2023/01/11/proekt-po-proizvodstvu-sledyashchih-gidroprivodov-poluchil-federalnuyu-podderzhku> (дата обращения: 16.12.2023).
10. Servo Valve Design for Faster Response in Motion Systems and also Low Contamination Susceptibility // Yuken Europe: website. URL: <https://yukeneurope.com/whitepaper-servo-valve-design-for-faster-response-in-motion-systems-and-also-low-contamination-susceptibility> (дата обращения: 16.12.2023).
11. PROFINET – Real-time communication in the field // Siemens: website. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/profinet.html> (дата обращения: 16.12.2023).
12. Rider: The Cross-Platform .NET IDE from JetBrains // JetBrains: website. URL: <https://www.jetbrains.com/rider/> (дата обращения: 16.12.2023).
13. Avalonia UI // Avalonia. URL: <https://avaloniaui.net/> (дата обращения: 16.12.2023).
14. Model-View-ViewModel // Microsoft Learn: website. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm> (дата обращения: 16.12.2023).
15. Just about Modbus RTU with detailed description and examples // IPC2U: website. URL: <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu/> (дата обращения: 16.12.2023).
16. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs // ST: website. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (дата обращения: 16.12.2023).

### References

1. Volovich G.I., Kirpichnikova I.M., Topolskiy D.V. Experimental operation of the adaptive electronic instrument transformer of current and voltage. In: *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. St. Petersburg, Russia; 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076216
2. Li Z. et al. A New Vibration Testing Platform for Electronic Current Transformers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019;68(3):704–712. DOI: 10.1109/TIM.2018.2854939
3. Karamguzhinova A.E., Kuznetsova V.N., Savinkin V.V., Koptyaev D.A. Electrohydrocylinder of increased efficiency: prospects for the development of mechatronic systems. *The Russian*

*Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):22–31. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31

4. Pashkov E.V., Kramar' V.A., Kabanov A.A. *Sledyashchie privody promyshlennogo tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Servo drives for industrial process equipment]. St. Petersburg: Lan Publ.; 2022. 368 p. (In Russ.)

5. Utenkov V.M. et al.; Chernyanskiy P.M. (Ed.) *Proektirovanie avtomatizirovannykh stankov i kompleksov: ucheb.* [Design of automated machines and complexes: textbook]. 2nd ed. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2014. Vol. 1. 331 p. (In Russ.)

6. Sveshnikov V.K. *Stanochnye gidroprivody: spravochnik* [Machine hydraulic drives: reference book]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2008. 640 p. (In Russ.)

7. Zelenko O.V., Egorychev A.I. [Software implementation of the ModBus protocol based on an electronic I/O module]. *Herald of Kazan technological university*. 2014;6. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnyaya-realizatsiya-protokola-modbus-na-osnove-elektronnogo-modulya-vvoda-vyvoda> (accessed 16.12.2023).

8. Efimova Y.V. Automated imaging system with the transfer parameters for MODBUS protocol. *Forum molodykh uchenykh*. 2018;12-2(28):512–521. (In Russ.)

9. The SUSU project for the production of tracking hydraulic drives received federal support. *South Ural State University: website*. (In Russ.) Available at: <https://www.susu.ru/ru/news/2023/01/11/proekt-po-proizvodstvu-sledyashchih-gidroprivodov-poluchil-federalnuyu-podderzhku> (accessed 16.12.2023).

10. Servo Valve Design for Faster Response in Motion Systems and also Low Contamination Susceptibility. *Yuken Europe: website*. Available at: <https://yukeneurope.com/whitepaper-servo-valve-design-for-faster-response-in-motion-systems-and-also-low-contamination-susceptibility> (accessed 16.12.2023).

11. PROFINET – Real-time communication in the field. *Siemens: website*. Available at: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/profinet.html> (accessed 16.12.2023).

12. Rider: The Cross-Platform .NET IDE from JetBrains. *JetBrains: website*. Available at: <https://www.jetbrains.com/rider/> (accessed 16.12.2023).

13. Avalonia UI. *Avalonia*. Available at: <https://avaloniaui.net/> (accessed 16.12.2023).

14. Model-View-ViewModel. *Microsoft Learn: website*. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm> (accessed 16.12.2023).

15. Just about Modbus RTU with detailed description and examples. *IPC2U: website*. Available at: <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu/> (accessed 16.12.2023).

16. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. ST: *website*. Available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (accessed 16.12.2023).

### **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](mailto:loginovskii@susu.ru).

**Волович Георгий Иосифович**, д-р техн. наук, проф., директор, ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия; [g\\_volovich@mail.ru](mailto:g_volovich@mail.ru).

**Топольский Дмитрий Валерианович**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [topolskiidv@susu.ru](mailto:topolskiidv@susu.ru).

**Топольский Никита Дмитриевич**, аспирант кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [topolskiind@susu.ru](mailto:topolskiind@susu.ru).

**Беляков Александр Евгеньевич**, старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [alex.beliakov@susu.ru](mailto:alex.beliakov@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; loginovskiiiov@susu.ru.

**Georgiy I. Volovich**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia; g\_volovich@mail.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.

***Статья поступила в редакцию 17.12.2023***

***The article was submitted 17.12.2023***