



О реализации функций релейной защиты автоматики цифровых электрических подстанций с использованием вычислительных комплексов семейства «Эльбрус»

С. А. Химич¹, Ю. С. Колесов^{1,2}, А. В. Глухов², Т. Р. Шарафеев³

¹ АО «МЦСТ», Москва, Россия

² ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука», Москва, Россия

³ АО «Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения», Нижний Новгород, Россия

Актуальность исследования обоснована внедрением на современных электрических подстанциях цифровых трансформаторов и необходимостью построения соответствующих цифровых систем релейной защиты автоматики. В статье рассмотрены основные принципы релейной защиты автоматики цифровых электрических подстанций. Исследованы проблемы ее реализации с использованием встраиваемых систем на базе отечественных вычислительных комплексов семейства «Эльбрус» с поддержкой защищенного режима исполнения программ. Приведена архитектура пользовательской программы по управлению системой релейной защиты автоматики на цифровой подстанции. Исходя из архитектуры пользовательских задач и требований промышленного стандарта сформированы ограничения, налагаемые на программную и аппаратную части вычислительных комплексов, применяемых во встраиваемых системах в данной отрасли. Приведены некоторые результаты применения защищенного режима в реальных задачах релейной защиты автоматики на цифровых подстанциях. Показано преимущество использования защищенного режима в задачах построения программ, управляющих промышленными объектами. Рассмотрено влияние защищенного режима на быстродействие и отказоустойчивость целевой системы.

Ключевые слова: электрическая подстанция, релейная защита автоматики, цифровой трансформатор, МЭК 61850, встраиваемая система, вычислительный комплекс «Эльбрус», операционная система Linux, защищенный режим

Для цитирования:

О реализации функций релейной защиты автоматики цифровых электрических подстанций с использованием вычислительных комплексов семейства «Эльбрус» / С. А. Химич, Ю. С. Колесов, А. В. Глухов, Т. Р. Шарафеев // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 1. С. 31–36. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-1-31-36

Realization of the power-system protection functions for digital power stations and using of Elbrus computers

S.A. Khimich¹, Yu. S. Kolesov^{1,2}, A.V. Gluhov², T.R. Sharafeev³

¹ MCST JSC, Moscow, Russia

² Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Brook, Moscow, Russia

³ Scientific and Research Company of General Machinery JSC, Nizhny Novgorod, Russia

The relevance of this study is justified by the introduction of digital transformers to modern electrical substations and the need to create relevant digital systems for the automatics relay protection. The article discusses the basic principles of automatics relay protection of the digital electrical substations. The authors examine the problems of its implementation with the use of embedded systems based on domestic computing systems of the Elbrus family with the support of a protected mode of program execution. They suggest an architecture of the user program for managing the automatics relay protection system at a digital substation. Based on the architecture of user tasks and the requirements of the industrial standard, the authors form the restrictions imposed on the software and hardware of the computing systems used in embedded systems in the industry. This paper presents some results of the protected mode in real problems of automatics relay protection at digital substations. The study demonstrates the advantage of using protected mode in creating programs that control industrial facilities. The authors consider the effect of protected mode on the performance and fault tolerance of the target system.

Keywords: electrical substation, automatics relay protection, digital transformer, IEC 61850, embedded system, Elbrus computer complex, Linux operating system, protected mode

For citation:

Khimich S.A., Kolesov Yu. S., Gluhov A.V., Sharafeev T.R. Realization of the power-system protection functions for digital power stations and using of Elbrus computers. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 1, pp. 31–36 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-1-31-36

Введение

В области автоматизации электрических подстанций все больше внимания уделяют применению цифровых технологий, а также внедрению готовых встраиваемых систем, способных решать те или иные задачи по управлению энергообъектами. К таким системам предъявляют высокие требования, обусловленные промышленными стандартами. Так, например, при построении систем релейной защиты автоматики на электрических подстанциях руководствуются стандартом МЭК 61850 (IEC 61850), регламентирующим форматы и способы передачи данных, требования к описанию электрических систем на всех уровнях энергосистемы [1–5].

Ввиду специфики данной индустриальной отрасли для систем энергоснабжения установлены повышенные требования к отказоустойчивости и производительности, что прямо отражается на используемых встраиваемых вычислительных системах. Наряду со всеми преимуществами перехода на цифровую технику, возникает также проблема ее защиты от вирусов. Они обусловлены, в частности, различными уязвимостями программного

и аппаратного обеспечения, применяемого во встраиваемых системах. Перечисленным требованиям во многом соответствуют вычислительные средства, разрабатываемые и поставляемые в рамках модульного ряда продукции «Эльбрус». Описанные в статье тестовые результаты были получены в процессе плановой работы, ставящей целью его практическое внедрение промышленного компьютера на базе процессора «Эльбрус» в центральные системы отечественной энергетики.

Общее описание системы релейной защиты автоматики

В функции релейной защиты автоматики входит управление цифровыми трансформаторами тока и напряжения. Система защиты также должна выполнять мониторинг состояния параметров линии электропередачи на протяжении всего времени ее работы, а при аварии на линии – в установленное время осуществлять предусмотренные действия: например, послать сигнал конечному устройству (реле). Общая схема системы релейной защиты автоматики для электрической подстанции представлена на рис. 1.

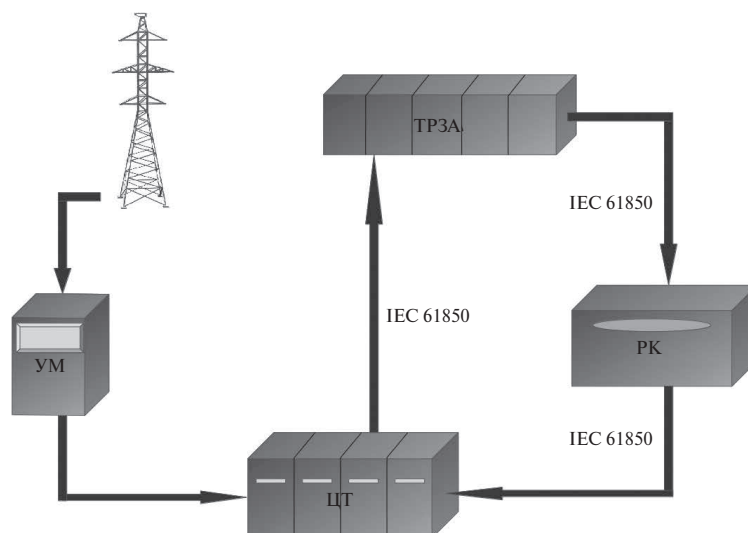


Рисунок 1. Общая схема релейной защиты автоматики для электрической подстанции: ТРЗА – терминалы релейной защиты автоматики; РК – релейная комната; ЦТ – цифровые трансформаторы; УМ – устройства мониторинга

Figure 1. The general scheme of automatics relay protection for electrical substation: TP3A – terminals of automatics relay protection; PK – relay room; ЦТ – digital transformers; УМ – monitoring devices

В зависимости от конкретной задачи пользователи системы сами разрабатывают алгоритмы ее управления и программную реализацию. В то же время пользовательская программа должна соответствовать требованиям стандарта МЭК 61850 (IEC 61850), регламентирующего формат и порядок обмена технологическими данными.

Программная реализация протокола МЭК 61850 (IEC 61850) обеспечивается кросс-платформенной библиотекой с открытым исходным кодом libIEC61850 [6], написанным на языке Си. Она предоставляет набор базовых функций и типов данных для обмена сообщениями нескольких видов:

- SV messages (sample values) – сообщения для передачи выборочных значений;
- MMS (multimedia messaging service) – сервис мультимедийных сообщений;
- GOOSE messages (generic object oriented substation event) – сообщения для общих объектно-ориентированных событий на подстанции.

В контексте рассматриваемой задачи SV-сообщения используют для передачи информации от цифрового трансформатора к серверу релейной защиты автоматики. Сервером в данном случае является «Эльбрус401-РС» (ТВГИ.466535.149), применяемый в качестве прототипа промышленного компьютера, на котором выполняется пользовательская программа релейной защиты автоматики. После обработки полученных SV-сообщений и выполнения некоторых условий сервер формирует GOOSE-сообщения, которые служат для отправки

команд к определенному устройству управления, например реле. MMS-сообщения, так же как и GOOSE, формирует сервер, но они служат для передачи информации о состоянии энергосистемы на автоматизированное рабочее место оператора, например на пользовательский компьютер с клиентской программой. В то время как MMS-сообщения практически не имеют строгих ограничений по времени доставки, SV- и GOOSE-сообщения должны быть строго детерминированы по времени согласно требованиям стандарта МЭК 61850 (IEC 61850), заданным в событийном протоколе передачи данных.

Таким образом, встраиваемая система должна обеспечивать прием и обработку SV-сообщений, а также формирование и отправку GOOSE-сообщений согласно временным условиям стандарта, что в свою очередь накладывает требования как на производительность пользовательской программы, так и на показатели сервера.

Характеристика пользовательского приложения

В процессе внедрения платформы «Эльбрус» для задач релейной защиты автоматики применили пользовательское приложение, предоставленное АО «НИПОМ». В качестве пользовательского программного обеспечения выступали «сервисы» – программы, работающие на сервере и выполняющие сбор и обработку SV-сообщений, а также формирование и отправку GOOSE-сообщений согласно стандарту МЭК 61850. Схема работы пользовательского приложения представлена на рис. 2.

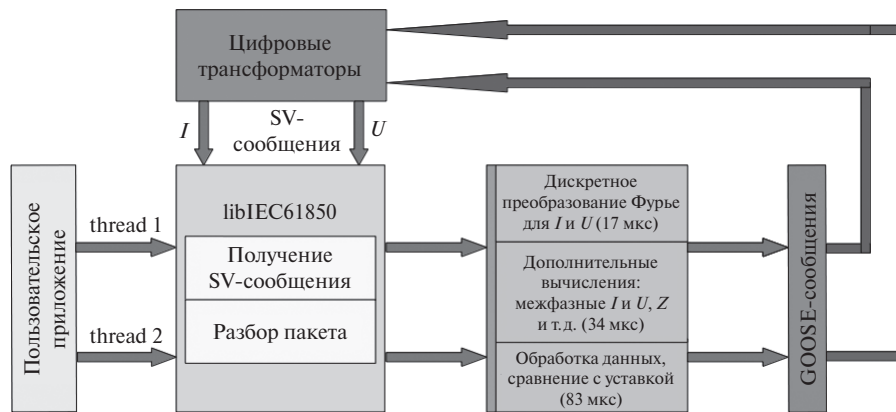


Рисунок 2. Схема работы пользовательского приложения: I – ток, A ; U – напряжение, B ; Z – комплексное сопротивление, Om ; thread 1, thread 2 – программные потоки 1 и 2
 Figure 2. The scheme of the user application: I – current, A ; U – voltage, V ; Z – complex impedance, Ohm ; thread 1, thread 2 – program threads 1 and 2

В общем случае в сервисе запускаются два программных потока (thread 1 и thread 2), задачи которых получение и обработка SV-сообщений от трансформаторов тока и напряжения. Прием и обработка SV-сообщений реализованы с помощью функций, предоставляемых библиотекой libIEC61850.

Далее следуют фазы основных и дополнительных вычислений токов, напряжений, комплексных сопротивлений и прочих параметров, от которых напрямую зависит состояние линии энергоснабжения. Затем полученные переменные сравниваются с уставкой – эталонным значением, и в случае выхода того или иного параметра за допустимые пределы программой принимается решение об отправке GOOSE-сообщения конечному исполнительному устройству – трансформатору или реле.

Фазы обработки SV-сообщений являются самыми затратными с точки зрения временных и вычислительных ресурсов. Кроме того, по требованиям МЭК 61850 (IEC 61850) для устройств релейной защиты автоматики частота отправки сообщений трансформатором составляет 4 МГц.

Таким образом, за промежуток, равный 250 мкс, сервер должен принять и обработать одно SV-сообщение до того, как придет следующий пакет. Такой большой поток сообщений в единицу времени оказывает существенную нагрузку на сервер и требует отдельного процессорного ядра для обработки прерываний.

Кроме сервисов на сервере также работает графический клиент, который в режиме реального времени позволяет следить за состоянием системы и срабатыванием защиты во время аварийных ситуаций на линии энергоснабжения.

В итоге исходя из архитектуры и функциональности системы релейной защиты автоматики хорошо структурированная и сбалансированная по нагрузке

системная реализация, обеспечивающая корректную работу всех частей пользовательского приложения, может быть снабжена четырьмя процессорными ядрами, способными справиться со следующей нагрузкой: на одном ядре обрабатываются прерывания от сетевого интерфейса (куда приходят пакеты от цифрового трансформатора), на двух других реализуются потоки сервисов приема и обработки SV-, GOOSE- и MMS-сообщений, на четвертом поддерживается работа графического клиента.

Тестовые результаты

Аппаратура встраиваемой вычислительной системы

В качестве встраиваемой вычислительной системы была определена рабочая станция «Эльбрус 401-PC» [7] на базе четырехъядерного процессора «Эльбрус-4С» с архитектурой «Эльбрус» и операционной системой на базе ядра Linux 4.9 и дистрибутива Debian 8. Основные показатели системы приведены в таблице.

Реализация защищенного режима

Архитектура «Эльбрус» поддерживает защищенный режим исполнения программ использованием специальных дескрипторов для обращения в память [8]. Этот режим поддерживается и программным обеспечением (uclibc-ng, ядро Linux), и аппаратной частью [9].

Концепция применения безопасных вычислений строится на том, что в программах на языке Си возможны некоторые ошибки (например, переполнение буфера), которые не фиксируются средствами компилятора, но могут привести к падению программы в процессе ее исполнения. Использование защищенного режима, позволяющего их обнаружить, при создании программных средств дает возможность разработчикам создавать более

Таблица. Технические характеристики «Эльбрус 401-РС»
Table. Elbrus 401-RS technical characteristics

Параметр / Parameter	Значение / Value
Микропроцессор	Эльбрус-4С
Количество процессоров	1
Количество ядер процессора	4
Тактовая частота процессора, МГц	800
Дисковая подсистема	Жесткий диск SATA 2.0 1000 Gb, 3.5 (до 2 дисков). Разъем для карты CompactFlash на плате. mSATA диск на плате емкостью 120 Gb
Сетевые интерфейсы	Поддержка работы при скоростях передачи данных 10/100/1000 Мбит/с

надежные и отказоустойчивые продукты, в частности, для управления узлами электростанции, в том числе и системой релейной защиты автоматики.

Пример фиксации ошибки при портировании библиотеки libIEC61850

В процессе портирования библиотеки libIEC61850 на архитектуру «Эльбрус» с использованием защищенного режима был обнаружен выход за границу массива. При исполнении данного участка кода пользователь либо не получал никаких сообщений об ошибке, либо изредка фиксировал падение программы с сообщением sigmentation fault (ошибка сегментации), обусловленным именно обращением к области памяти, находящейся за границей выделенной программе страницы памяти. То есть ошибка в обычном режиме была плавающей, в то же время благодаря внедрению защищенного режима удалось выявить ее в пользовательском программном обеспечении еще на этапе отладки и предотвратить выход его из строя в процессе эксплуатации.

Временные характеристики

В процессе тестирования встраиваемой системы были получены следующие значения времени итерации обработки SV-сообщений:

- для обычного режима – 166 мкс;
- для защищенного режима – 201 мкс.

На основе этих данных можно заключить, что применение защищенного режима в данной задаче ухудшает временные показатели на 20%, однако при этом не превышаются рамки 250 мкс, что позволяет серверу корректно получать и обрабатывать сообщения от цифровых трансформаторов, а также формировать и отправлять GOOSE- и MMS-сообщения.

Выводы

В статье исследовалось применение отечественных вычислительных комплексов с архитектурой «Эльбрус» для реализации безопасного режима вычислений в области релейной защиты автоматики электрических подстанций. Функциональность встраиваемых систем данного типа регламентирует стандарт МЭК 61850 (IEC 61850). В работе применялось пользовательское многопоточное программное обеспечение – сервисы для сбора, обработки и передачи информации о состоянии линии энергоснабжения. Оно включает в себя программную библиотеку libIEC61850 для соответствия МЭК 61850. Эксперименты проводились на рабочей станции «Эльбрус 401-РС», используемой в качестве сервера приема и обработки данных, а также формирующей сообщения обратной связи для цифровых трансформаторов. В ходе портирования библиотеки libIEC61850 на архитектуру «Эльбрус» благодаря применению защищенного режима вычислений была обнаружена уязвимость данной библиотеки, которая могла привести к падению пользовательского программного обеспечения и отказу системы релейной защиты автоматики. Измерения временных показателей приема и обработки сервером пакетов от центральных трансформаторов выявили падение производительности на 20% при использовании защищенного режима в данной задаче, что, с одной стороны, не повлияло существенным образом на производительность системы в целом, а с другой, позволило повысить отказоустойчивость программного обеспечения. По итогам работы принято решение по изготовлению промышленного компьютера на базе процессора «Эльбрус-4С».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 54835–2011. Сети и системы связи на подстанциях. Ч. 1. Ведение и обзор. М.: Стандартинформ, 2012. 36 с.
2. ГОСТ Р 54835–2011. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 2. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 45 с.

3. *ГОСТ Р МЭК 61850-3-2005*. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 3. Основные требования. М.: Стандартинформ, 2013. 10 с.
4. *ГОСТ Р МЭК 61850-5-2011*. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 5. Требования к связи для функций и моделей устройств. М.: Стандартинформ, 2013. 130 с.
5. *ГОСТ Р МЭК 61850-7-1-2009*. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 7. Базовая структура связи для подстанций и линейного оборудования. Раздел 1. Принципы и модели. М.: Стандартинформ, 2013. 118 с.
6. Библиотека *libIEC61850*. Официальный сайт разработчиков [Электронный ресурс]. URL: <http://libiec61850.com/libiec61850> (дата обращения: 04.01.2019).
7. Каталог продукции ИНЭУМ. Официальный сайт ПАО «ИНЭУМ им Брука» [Электронный ресурс]. URL: http://ineum.ru/files/59db40/730cd8/502916/000000/katalog_produktsii_ineum_2017ls.pdf (дата обращения: 04.01.2019).
8. Волконский В. Ю. Безопасная реализация языков программирования на базе аппаратной и системной поддержки // Вопросы радиоэлектроники. 2008. Т. 4, № 2. С. 98–141.
9. Безопасная среда исполнения критических приложений во встраиваемых системах на базе вычислительных средств семейства «Эльбрус» / Мустафин Т. Р., Алехин А. И., Кравцунов Е. М., Макаев Б. О. // Радиопромышленность. 2019. № 1. С.

REFERENCES

1. GOST R 54835–2011. *Seti i sistemyi svyazi na podstantsiyah. Ch. 1. Vvedenie I obzor* [State Standart IEC 61850 IEC/TR 61850–1:2003. Communication networks and systems in substations. P. 1. Introduction and overview]. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 36 p. (In Russian).
2. GOST R 54835–2011. *Seti i sistemyi svyazi na podstantsiyah. Ch. 2. Terminy I opredeleniya* [State Standart IEC61850 IEC/TR61850–2:2003. Communication networks and systems in substations. P. 2. Glossary]. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 45 p. (In Russian).
3. GOST R MEK 61850–3–2005. *Seti i sistemyi svyazi na podstantsiyah. Ch. 3. Osnovie trebovaniya* [State Standart IEC61850-3–2011. Communication networks and systems in substations. P. 3. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 10 p. (In Russian).
4. GOST R MEK 61850–5–2011. *Seti i sistemyi svyazi na podstantsiyah. Ch. 5. Trebovaniya k svyazi dlya funktsiy i modeley ustroystv* [State Standart IEC61850-5–2011. Communication networks and systems in substations. P. 5. Communication requirements for functions and device models]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 130 p. (In Russian).
5. GOST R MEK 61850-7-1–2009. *Seti i sistemyi svyazi na podstantsiyah. Ch. 7. Bazovaya struktura svyazy dlyz podstanciy i lineynogo oborudovaniya* [State Standart IEC61850-5–2009. Communication networks and systems in substations. P. 7. Basic communication structure for substation and feeder equipment. Principles and models]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 118 p. (In Russian).
6. LibIEC61850 library [Website of developers]. Available at: <http://libiec61850.com/libiec61850> (accessed 04.01.2019).
7. Product catalog of INEUM [Website of PJSC Brook INEUM] (In Russian). Available at: http://ineum.ru/files/59db40/730cd8/502916/000000/katalog_produktsii_ineum_2017ls.pdf (accessed 04.01.2019).
8. Volkonskiy V. Y. Secure implementation of programming languages and hardware based system support. *Voprosy radioelektroniki*, 2008, vol. 4, no. 2, pp. 98–141. (In Russian).
9. Mustafin T. R., Alekhin A. I., Kravtsunov E. V., Makaev B. O. Secure execution environment for critical applications in embedded systems based on «Elbrus» family computing facilities. *Radiopromyshlennost*, 2019, no. 1, pp. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Химич Сергей Александрович, аспирант, РТУ МИРЭА, инженер-программист 2-й категории, АО «МЦСТ», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (499) 135-33-21, e-mail: sergey.a.himich@mcst.ru.

Колесов Юрий Сергеевич, ведущий инженер-программист, АО «МЦСТ», ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (499) 135-33-21, e-mail: yuriy.s.kolesov@mcst.ru.

Глухов Антон Викторович, к.т.н., начальник отдела, ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (495) 455-57-51, e-mail: glukhov_a@ineum.ru.

Шарафеев Тимур Рамильевич, инженер, АО «Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения», 603950, Нижний Новгород, просп. Ленина, д. 20, тел.: +7 (800) 100-43-44, e-mail: t.sharafeev@nipom.ru.

AUTHORS

Sergey A. Khimich, graduate student, RTU MIREA, software engineer of the 2st category, MCST JSC, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (499) 135-33-21, e-mail: sergey.a.himich@mcst.ru.

Yuriy S. Kolesov, lead offtware engineer, Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Brook, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (499) 135-33-21, e-mail: yuriy.s.kolesov@mcst.ru.

Anton V. Glukhov, Ph.D. (Engineering), head of department, Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Brook, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (495) 455-57-51, e-mail: glukhov_a@ineum.ru.

Timur R. Sharafeev, engineer, Scientific and Research Company of General Machinery JSC, 20, prospect Lenina, Nizhny Novgorod, 603950, Russia, tel.: +7 (800) 100-43-44, e-mail: t.sharafeev@nipom.ru.

Поступила 30.10.2018; принята к публикации 20.12.2018; опубликована онлайн.
Submitted 30.10.2018; revised 20.12.2018; published online.