

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Г.И. Волович¹, g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

Д.В. Топольский², topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

Н.Д. Топольский², topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

А.А. Максимов³, <https://orcid.org/0000-0002-1476-0663>

¹ ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³ Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия

Аннотация. В представленной статье исследуется тема оптимизации системы управления программно-аппаратного комплекса для учета электроэнергии. Система управления играет решающую роль в точном измерении и контроле потребления электроэнергии. Основной целью данного исследования является выявление и внедрение методов оптимизации, которые повышают производительность и результативность системы управления. **Цель исследования.** На основе анализа существующих электротехнических комплексов разработать архитектуру, имитационные цифровые модели, алгоритмы эффективного управления и методику эксплуатации электротехнического комплекса на базе трехфазных цифровых измерительных трансформаторов с системой управления отечественного производства для учета электроэнергии в высоковольтных сетях переменного тока, обеспечивающих работоспособность и качество функционирования в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях. **Материалы и методы.** Поставленные научные задачи решены с применением общей теории электротехнических комплексов и систем, теории автоматического управления, методов физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем. **Результаты.** В статье отражено развитие общей теории электротехнических комплексов, включающих в себя цифровые комбинированные измерительные трансформаторы и систему управления в виде отдельно стоящего модуля объединения, в части оптимизации системных связей компонентов электротехнических комплексов учета электроэнергии. Предлагается повысить интеллектуальный уровень оконечного устройства для обеспечения возможности проведения первичного анализа данных ещё на первом уровне архитектуры системы учета электроэнергии. **Заключение.** Основным практическим результатом проведенных исследований является изготовление прототипа электротехнического комплекса на основе опытных образцов адаптивных цифровых трансформаторов тока и напряжения и системы управления электротехнического комплекса для учета электроэнергии на основе универсальной платформы для измерительных трансформаторов. Такое построение цифрового трехфазного измерительного трансформатора и универсальный оконечный блок (модуль объединения) позволяют на основе разработанного прототипа сравнительно просто разрабатывать аналогичные устройства с другими диапазонами токов и напряжений. В существующих комбинированных измерительных трансформаторах такое сочетание первичных преобразователей не используется.

Ключевые слова: цифровой измерительный трансформатор, устройство объединения, МЭК-61850, АСУ ТП подстанции, цифровая подстанция, комплекс учета электроэнергии

Для цитирования: Оптимизация системы управления программно-аппаратного комплекса для учета электроэнергии / Г.И. Волович, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский, А.А. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 4. С. 57–65. DOI: 10.14529/ctcr230406

OPTIMIZATION OF THE CONTROL SYSTEM OF A SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR ELECTRICITY ACCOUNTING

G.I. Volovich¹, g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>
D.V. Topolskii², topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>
N.D. Topolskii², topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>
A.A. Maksimov³, <https://orcid.org/0000-0002-1476-0663>

¹ LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

³ State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia

Abstract. The presented article explores the topic of optimizing the control system software and hardware complex for electricity metering. The control system plays a crucial role in accurately measuring and monitoring electricity consumption. The main objective of this research is to identify and implement optimization techniques that enhance the performance and efficiency of the control system. **Aim.** Based on the analysis of existing electrical complexes, to develop an architecture, simulation digital models, effective control algorithms and methods of operation of an electrical complex based on three-phase digital measuring transformers with a control system of domestic production for electricity metering in high-voltage AC networks, ensuring operability and quality of functioning in various modes under various external influences. **Materials and methods.** The scientific tasks have been solved using the general theory of electrical complexes and systems, the control systems theory, methods of physical, mathematical, simulation and computer modeling of components of electrical complexes and systems. **Results.** The article reflects the development of the general theory of electrical complexes, including digital combined measuring transformers and a control system in the form of a stand-alone integration module, in terms of optimizing system connections of components of electrical power metering complexes. **Conclusion.** The main practical result of the conducted research is the production of a prototype of an electrical complex based on prototypes of adaptive digital current and voltage transformers and an electrical complex control system for electricity metering based on a universal platform for measuring transformers. Such a construction of a digital three-phase measuring transformer and a universal terminal block (unification module) make it relatively easy to develop similar devices with other current and voltage ranges based on the developed prototype. In existing combined measuring transformers, such a combination of primary converters is not used.

Keywords: electronic instrument transformer, merging unit, IEC-61850, Substation Automation System, digital substation, electricity metering complex

For citation: Volovich G.I., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Maksimov A.A. Optimization of the control system of a software and hardware complex for electricity accounting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(4):57–65. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230406

Введение

Системы учета электроэнергии играют ключевую роль в энергетических системах, обеспечивая точное и эффективное управление энергопотреблением. С развитием цифровых технологий и автоматизации процессов все больше компаний стремятся оптимизировать свои системы учета электроэнергии. Оптимизация системы управления программно-аппаратного комплекса учета электроэнергии становится неотъемлемой частью этого процесса.

Цель данной статьи состоит в рассмотрении различных аспектов оптимизации системы управления программно-аппаратного комплекса учета электроэнергии. Мы рассмотрим основные проблемы, с которыми сталкиваются при управлении энергопотреблением, а также предложим решения, основанные на применении современных технологий и методов.

В ходе статьи будут рассмотрены следующие аспекты оптимизации системы управления программно-аппаратного комплекса учета электроэнергии:

- 1) оптимизация системы управления программно-аппаратным комплексом;
- 2) оптимизация выявления аварийной ситуации и реакции на нее;
- 3) предложение применения алгоритмов машинного обучения для прогнозирования и оптимизации выявления аварийных ситуаций [1–10].

1. Актуальность цифровой энергетики

Цифровая энергетика является важной составляющей цифровой экономики будущего. Ожидается, что в ближайшей перспективе цифровизация позволит компаниям в энергетическом секторе увеличить свою выручку на 3–4 % и создать основу для дальнейшего устойчивого роста.

Мировой рынок электроэнергии меняется в связи с цифровизацией, что приводит к увеличению сложности энергетической системы и требует большего обмена информацией между ее компонентами. В настоящее время определены основные тенденции развития электроэнергетики, такие как цифровизация производства и передачи энергии, создание распределенной генерации, агрегаторов спроса и виртуальных электростанций.

Однако существуют проблемы, связанные с высокой ценой электроэнергии для конечных потребителей и необходимостью строительства современной энергетической инфраструктуры с учетом различных факторов.

Для успешной реализации цифровой энергетики необходимо оптимизировать систему управления программно-аппаратным комплексом учета электроэнергии, что включает в себя сбор и передачу данных, анализ энергопотребления, применение алгоритмов машинного обучения и внедрение системы мониторинга и удаленного доступа.

Надежность и эффективность цифровых подстанций также играют важную роль. Необходимо правильно распределить трафик в сети и соблюдать стандарт цифровых подстанций IEC-61850, чтобы обеспечить универсальность компонентов и оптимизировать их стоимость и удобство использования.

В целом цифровая энергетика предоставляет большие возможности для развития и оптимизации энергетической системы. Однако необходимо учитывать различные факторы и принимать меры для реализации этих возможностей [11–20].

2. Система учета электроэнергии на базе измерительного трансформатора ТРАТОН-110

Цифровой трансформатор является обязательным компонентом системы учета электроэнергии. Существует много различных типов цифровых трансформаторов, и одним из перспективных является ТРАТОН-110. Это комбинированный измерительный трансформатор, который может измерять как ток, так и напряжение. Он отличается компактными размерами, небольшим весом и доступной ценой.

Задача состоит в создании системы учета электроэнергии на основе трех цифровых трансформаторов ТРАТОН-110 (рис. 1), которая соответствует стандарту МЭК-61850. Основным отличием этой системы от существующих является возможность быстрого реагирования на внештатные ситуации. Для этого система должна обладать следующими свойствами:

- 1) соответствие требованиям стандарта IEC-61850;
- 2) безыскаженная передача информации в экстремальных режимах;
- 3) высокая точность измерений (класс 0,2S);
- 4) встроенная диагностика и контроль тестирования;
- 5) передача данных в SCADA-систему.



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

Трансформатор передает информацию о значениях тока и напряжения, а также флаги качества измеренных данных. Блок слияния собирает посылку в формате IEC-61850-9-2 и анализирует флаги качества измерений. При возникновении аварийной ситуации блок слияния отправляет сообщение GOOSE в систему управления информацией. В настоящее время неизвестно, любое ли из существующих устройств этого типа сигнализирует об аварии [21–25]. Поэтому целесообразно использовать эту информацию для повышения интеллектуальности интерфейсного устройства. Это позволит сократить время реакции на внештатные ситуации в системе. Устройство считается интеллектуальным, если оно выполняет часть функций управления. Чем выше уровень интеллекта устройства, тем больше функций может выполнять система управления.

3. Цифровой трансформатор как часть системы учета электроэнергии

Цифровой трансформатор играет важную роль в архитектуре системы учета электроэнергии. Он является одним из ключевых компонентов, обеспечивающих точные и надежные измерения потребления электроэнергии.

Цифровой трансформатор преобразует измеренные данные о токе и напряжении в цифровой формат, что позволяет получать более точные результаты. Он также обладает высокой точностью измерений, что является важным фактором для достоверного учета электроэнергии.

В архитектуре системы учета электроэнергии цифровой трансформатор выполняет ряд функций. Он передает данные об измерениях в режиме реального времени, что позволяет операторам системы наблюдать и анализировать потребление электроэнергии в реальном времени. Это особенно важно для эффективного управления и оптимизации системы учета электроэнергии (рис. 2).

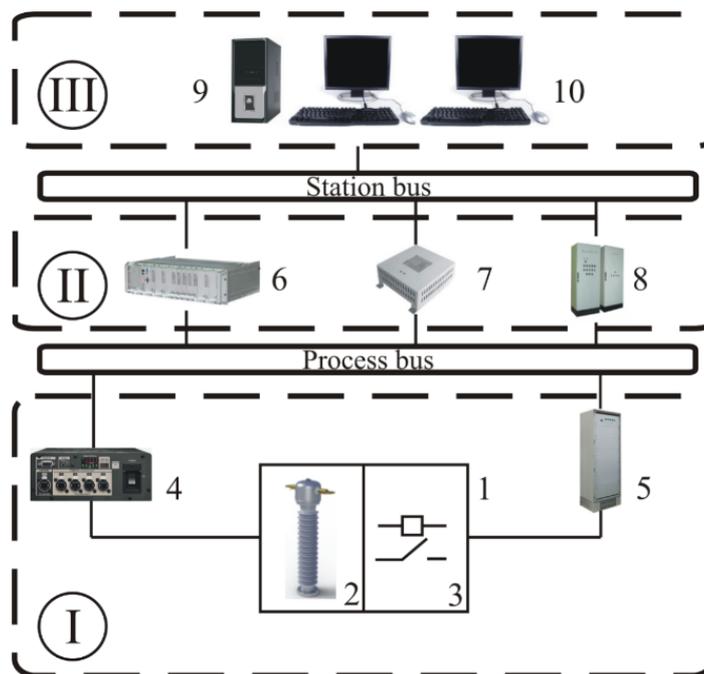


Рис. 2. Архитектура системы учета электроэнергии
Fig. 2. Architecture of the electricity metering system

Цифровой трансформатор также интегрируется с системой управления энергетическими данными. Он передает данные об измерениях в систему SCADA или другую систему управления, что позволяет операторам эффективно контролировать и управлять энергетическими процессами.

Кроме того, цифровой трансформатор поддерживает возможность удаленного мониторинга и управления. Операторы могут получать данные о потреблении электроэнергии и управлять энергетической системой из любого места, что повышает гибкость и эффективность управления.

Таким образом, цифровой трансформатор является важной частью архитектуры системы учета электроэнергии. Он обеспечивает точные измерения, передачу данных в режиме реального времени, интеграцию с системой управления и возможность удаленного мониторинга. Все это способствует повышению наблюдательности энергетической системы, и как следствие – улучшению энергоэффективности и сокращению затрат на электроэнергию.

4. Оптимизация реакции системы управления на аварийное событие

На цифровых подстанциях сигналы реакции системы управления на аварийные события вырабатываются устройствами второго и третьего уровня иерархии. Соответственно для передачи технологической информации с первого уровня системы управления на верхние и обратно требуются затраты времени. В том случае, если обеспечить выработку сигналов об аварийных ситуациях на первом уровне, время реакции на аварийные ситуации будет снижено. Для изучения теоретических предпосылок было проведено экспериментальное исследование. Использовались три измерительных трансформатора ТРАТОН-110 и оконечный блок «Авача» в качестве основы для реализации системы учета электроэнергии. Схема подключения представлена на рис. 3.

Рассмотрим подробнее реакцию системы учета электроэнергии на аварийное событие. Измеренные данные измерительными трансформаторами собираются в посылку формата МЭК-61850-9-2 внутри оконечного блока. Затем данные формата МЭК-61850-9-2 пересылаются через шину процесса остальным интеллектуальным устройствам системы учета электроэнергии, которые выполняют функции релейной защиты и автоматики. Таким образом данные собираются в посылку формата МЭК-61850-9-2 и затем разбираются для внутреннего пользования каждого из интеллектуальных устройств.

В целях оптимизации времени реакции на аварийные ситуации предлагается повысить интеллектуальный уровень оконечного устройства, чтобы производить первичный анализ данных еще на первом уровне архитектуры системы учета электроэнергии. Таким образом, оконечный блок при формировании посылки сможет также проанализировать измеренные цифровыми трансформаторами данные, которые он собирает в посылку МЭК-61850-9-2, и без дополнительных пересылок на другие уровни архитектуры системы учета электроэнергии определить аварийную ситуацию. После определения оконечный блок отправит в систему учета электроэнергии уже управляющее GOOSE-сообщение формата МЭК-61850-8-1 с данными об аварийной ситуации.

Подсчитаем сложность данного алгоритма. Согласно теории алгоритмов, все блоки, отвечающие за линейные действия, принято считать за 1, или на языке оценки сложности алгоритмов – $O(1)$. Цикл с одним параметром необходимо считать как $O(n)$. И есть правило, что сложность вложенных циклов – это перемноженные сложности внешнего и внутреннего цикла, а сложность линейных блоков – сумма сложностей. Так же, так как сложность алгоритма является по своей сути пределом функции от n , слагаемые у многочленов меньших степеней можно сокращать.

Оценим сложности алгоритмов реакции на аварийную ситуацию. Блок-схемы рассматриваемых алгоритмов представлены на рис. 4 и 5. При пересылке данных сложность алгоритма при обработке данных оконечным блоком составляет $O(n^2)$. Сложность алгоритма пересылки данных – $O(1)$. Сложность алгоритма повторной обработки данных на РЗА – $O(n^2)$. Таким образом, сложность текущего алгоритма составит

$$O(1 + n^2 + 1 + n^2) = O(2n^2 + 2) = O(2n^2). \quad (1)$$

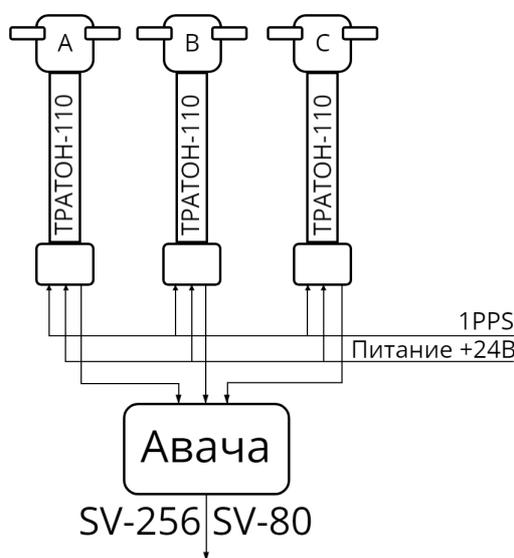


Рис. 3. Схема подключения оконечного блока системы учета электроэнергии
Fig. 3. Connection diagram of merging unit of the electricity metering system

Оценим сложность алгоритма в случае, когда данные проверяются на аварийную ситуацию в конечном блоке:

$$O(1 + n^2 + 1) = O(n^2 + 2) = O(n^2). \quad (2)$$

Зная (1) и (2), сравним полученные результаты оценки алгоритмов:

$$O(2n^2) \gg O(n^2). \quad (3)$$

Зная (3), очевидно, что в случае применения оптимизации, когда данные проверяются на аварийную ситуацию в конечном блоке, сложность вычислений ниже, соответственно, в этом случае теоретически оптимизация является существенной.

В процессе испытаний цифровых измерительных трансформаторов ТРАТОН-110 в связке с конечным блоком «Авача» измерительная система работала корректно. Кроме того, во время теста измерялась мощность процессора «Авача». Во время работы процессор блока был загружен не полностью.

Расчеты показали, что мощности этого устройства достаточно, чтобы не задерживать посылку стандарта МЭК-61850-9-2 и дополнительно анализировать измеренные данные, генерировать и отправлять управляющее GOOSE-сообщение формата МЭК-61850-8-1 об аварии. В результате моделирования данной ситуации аварии были зарегистрированы в среднем в 1,6 раза быстрее.

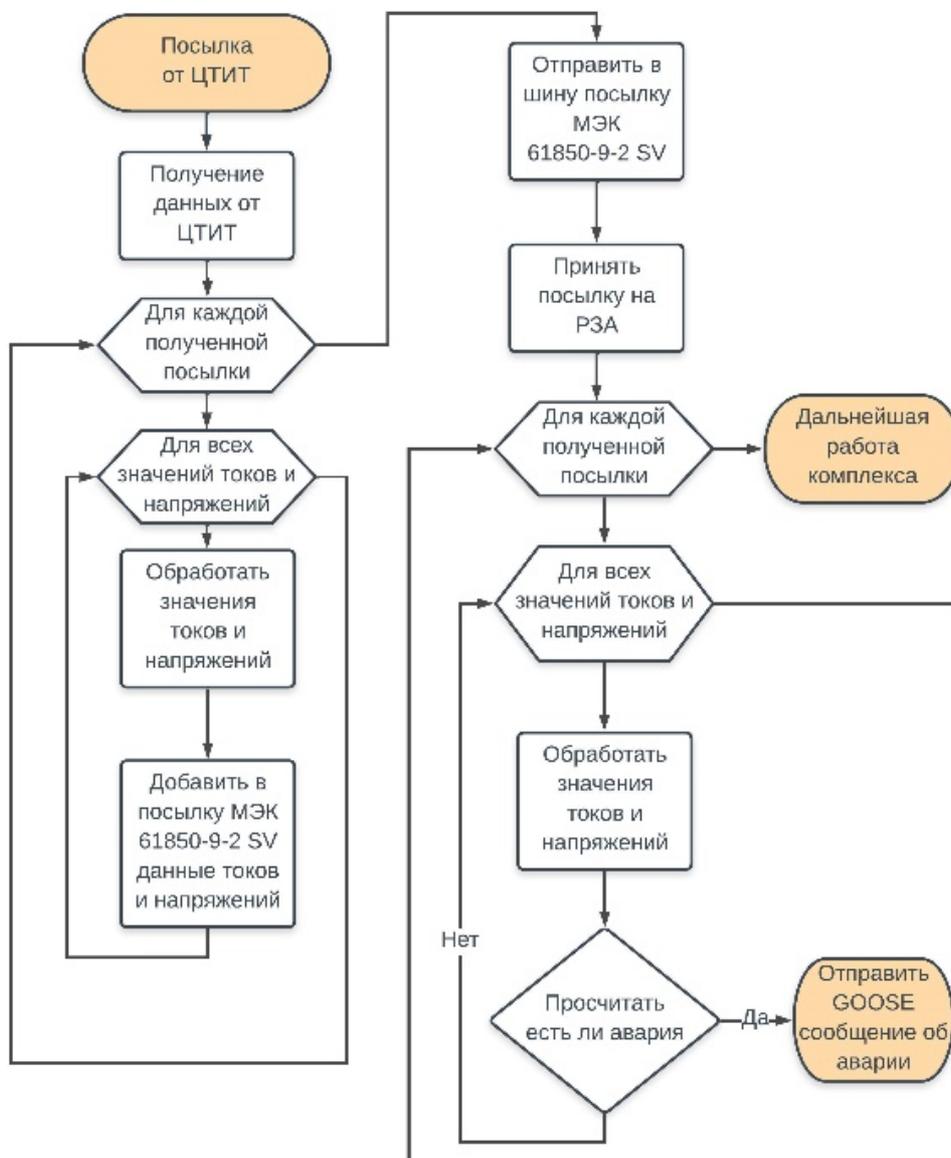


Рис. 4. Стандартный алгоритм обработки данных
Fig. 4. Standard data processing algorithm

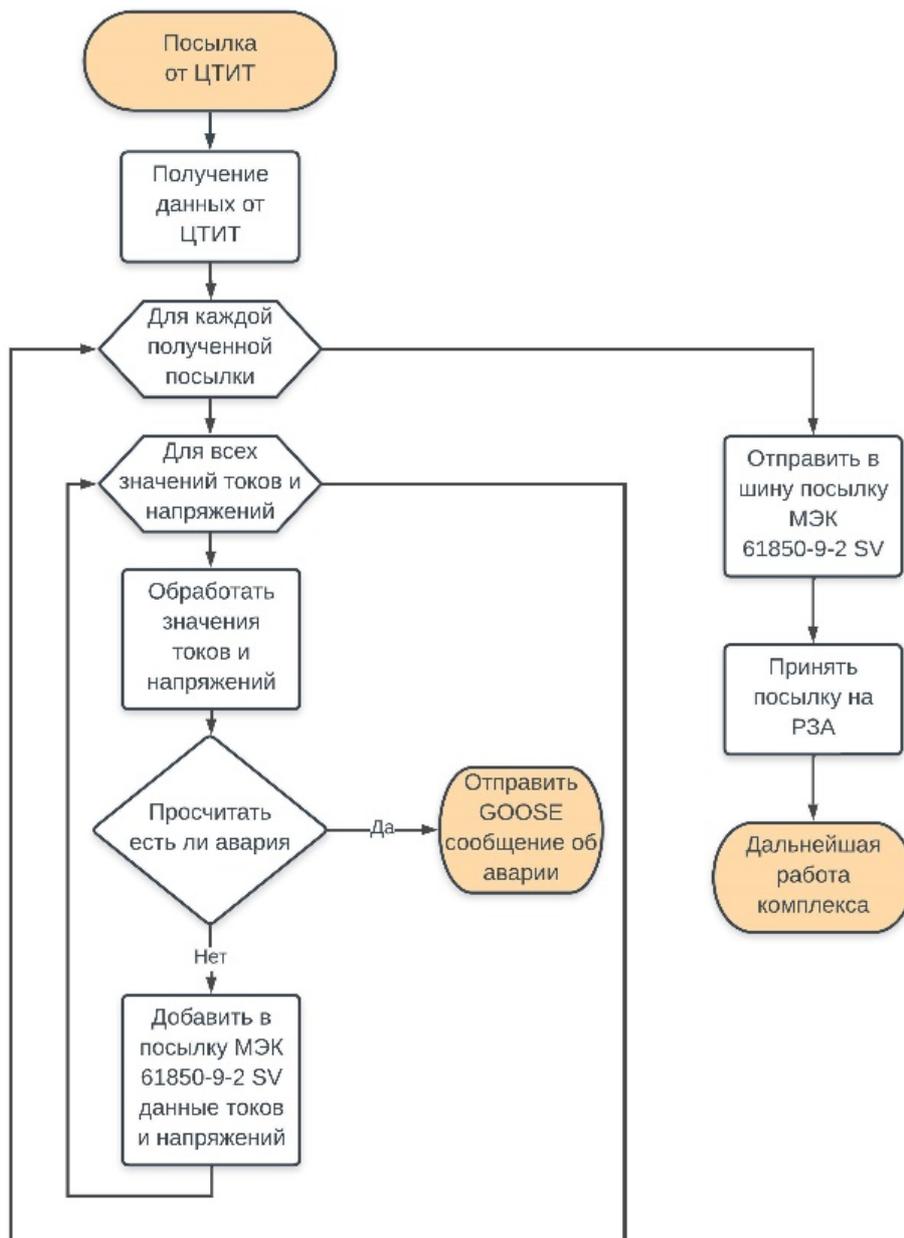


Рис. 5. Оптимизированный алгоритм обработки данных
Fig. 5. Optimized data processing algorithm

Чтобы снизить нагрузку на оконечное устройство и охватить большее количество аварийных ситуаций, предлагается применить алгоритмы машинного обучения на основе данных от реальных объектов с указанием выявленных аварийных ситуаций. После использования алгоритмов машинного обучения на выходе будет нейронная сеть, которая сможет делать более точное предсказание об аварийной ситуации и срабатывать в больших количествах аварийных случаев.

Выводы

Основываясь на результатах исследования, были сделаны следующие выводы.

1. Система управления программно-аппаратным комплексом была оптимизирована.
2. Оптимизация выявления аварийной ситуации является теоретически и практически существенной.
3. Предложена оптимизация системы с применением алгоритмов машинного обучения для прогнозирования и оптимизации выявления аварийных ситуаций.
4. Цели исследования достигнуты.

Список литературы/References

1. Smith J. Optimization Techniques for Control System Software and Hardware Complexes. *International Journal of Electrical Engineering*. 2018;42(3):156–167.
2. Brown A., Johnson R. Improving Performance of Control System Software and Hardware Complexes for Electricity Metering through Optimization. *Journal of Power Engineering*. 2019;28(2):89–102.
3. Anderson T. Advanced Algorithms for Optimization of Control System Software and Hardware Complexes in Electricity Metering Applications. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020;35(4):2567–2582.
4. White S., Davis M. Optimization Strategies for Control System Software and Hardware Complexes in Electricity Metering. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*. 2017;7(1):45–57.
5. Garcia L., Martinez C. Optimization Techniques for Control System Software and Hardware Complexes in Smart Grids. *Energy Procedia*. 2016;100:123–132.
6. Johnson E., Thompson G. Enhancing Efficiency of Control System Software and Hardware Complexes for Electricity Metering through Optimization. *International Journal of Power and Energy Systems*. 2018;38(2):78–91.
7. Brown M., Wilson D. Optimization Models for Control System Software and Hardware Complexes in Electricity Metering. *Journal of Electrical Engineering and Automation*. 2019;23(3):167–180.
8. Anderson J., Smith K. Application of Optimization Techniques in Control System Software and Hardware Complexes for Electricity Metering. *International Journal of Power Electronics and Energy Conversion Systems*. 2020;10(4):234–247.
9. Davis R., Garcia L. Optimization Approaches for Control System Software and Hardware Complexes in Electricity Metering. *Journal of Energy Engineering*. 2017;143(6):1–14.
10. Thompson E., Martinez C. Optimization of Control System Software and Hardware Complexes for Improved Electricity Metering. In: *Proceedings of the International Conference on Power Engineering and Renewable Energy*. 2016. P. 45–52.
11. Zhao Y.-B., Zhou S.-B., Ma Z.-Y. Research and manufacture of merging unit based on IEC 61850-9-2. *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control*. 2010.
12. Mohagheghi S., Stoupis J., Wang Z. Communication protocols and networks for power systems – Current status and future trends. In: *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*. 2009, no. 4840174.
13. Mackiewicz R.E. Overview of IEC 61850 and benefits // In: *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. PES*. 2006, no. 1709546.
14. Djokić B., So E. Calibration system for electronic instrument transformers with digital output. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2005;54(2):479–482.
15. Manbachi M., Sadu A., Farhangi H., Monti A., Palizban A., Ponci F., Arzanpour S. Real-Time Co-Simulation Platform for Smart Grid Volt-VAR Optimization Using IEC 61850. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2016;12(4):1392–1402, no. 7470528.
16. Hoyos J., Dehus M., Brown T.X. Exploiting the GOOSE protocol: A practical attack on cyber-infrastructure // In: *2012 IEEE Globecom Workshops*. 2012. P. 1508–1513, no. 6477809.
17. Yamada T., Kon S., Hashimoto N., Yamaguchi T., Yazawa K., Kondo R., Kurosawa K. ECT evaluation by an error measurement system according to IEC 60044-8 and 61850-9-2. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012;27(3):1377–1384, no. 6180207.
18. Palensky P., Dietrich D. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2011;7(3):381–388, no. 5930335.
19. Sidhu T.S., Yin Y. Modeling and simulation for performance evaluation of IEC 61850-based substation communication systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007;22(3):1482–1489.
20. Andersson L., Brunner C., Engler F. Substation automation based on IEC 61850 with new process-close technologies. In: *2003 IEEE Bologna PowerTech – Conference Proceedings*. 2003. Vol. 2. P. 6–11, no. 1304321.
21. IEC 61850-3:2013 Communication networks and systems for power utility automation – Part 3: General requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6010> (accessed: 20.08.2023).
22. IEC 61850-5:2013 Communication networks and systems for power utility automation – Part 5: Communication requirements for functions and device models. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6012> (accessed 20.08.2023).

23. IEC 61850-7-1:2011+AMD1:2020 CSV Consolidated version. Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-1: Basic communication structure – Principles and models. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/67536> (accessed 20.08.2023).

24. IEC 61850-8-1:2011+AMD1:2020 CSV Consolidated version. Communication networks and systems for power utility automation – Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/66585> (accessed 20.08.2023).

25. IEC 61850-9-2:2011 Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/66549> (accessed 20.08.2023).

Информация об авторах

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, проф., директор, ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия; g_volovich@mail.ru.

Топольский Дмитрий Валерианович, кандидат технических наук, доцент, доцент 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.

Максимов Александр Александрович, д-р техн. наук, депутат, Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, Москва, Россия.

Information about the authors

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 A. Maksimov, Dr. Sci. (Eng.), Deputy, State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russia.

Статья поступила в редакцию 28.08.2023

The article was submitted 28.08.2023