

УДК 621.316.925

Обоснование актуальности защиты контактной сети наземного городского электрического транспорта от малых токов короткого замыкания

А. В. Агунов¹, А. В. Щербань², Д. Д. Архипов²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²СПб ГУП «Горэлектротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15

Для цитирования: Агунов А. В., Щербань А. В., Архипов Д. Д. Обоснование актуальности защиты контактной сети наземного городского электрического транспорта от малых токов короткого замыкания // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 28–36. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-28-36

Аннотация

Цель: Цель настоящей работы заключается в создании эффективной системы защиты контактной сети наземного городского электрического транспорта от малых токов короткого замыкания, возникающих преимущественно в местах пересечений путей и при нарушениях правил эксплуатации подвижного состава. Несмотря на наличие существующих методов защиты, такие аварии часто приводят к серьезным последствиям — полному выходу из строя отдельных участков сети и остановке пассажирского движения. **Методы:** Методы исследования включают анализ действующих систем защиты питающих линий, выявление недостатков существующей схемы защиты, а также разработку нового алгоритма распознавания аварийных ситуаций, вызванных маломощными короткими замыканиями. **Результаты:** Полученные промежуточные результаты экспериментальной эксплуатации показывают перспективность дальнейших исследований в области малых токов короткого замыкания. Внедрение быстroredействующих систем регистрации аварийных процессов позволяет эффективно обнаруживать и устранять угрозы, возникающие при небольших значениях токов короткого замыкания. Проведение дальнейших испытаний запланировано на последующие годы, итоговая задача состоит в полной автоматизации процесса выявления и предотвращения аварийных режимов контактной сети, связанных с малыми токами короткого замыкания. **Практическая значимость:** Практическое значение работы определяется возможностью значительно повысить надежность электроснабжения городских транспортных сетей, снизить частоту вынужденных простоев общественного транспорта и минимизировать риски безопасности пассажиров. Результаты исследования имеют потенциал широкого внедрения в практику эксплуатационных служб предприятий городского электротранспорта, обеспечивая стабильную работу инфраструктуры и повышение качества обслуживания населения.

Ключевые слова: Городской электрический транспорт, защита контактной сети, короткое замыкание, рекуперация энергии, мониторинг.

Несмотря на то, что на сегодняшний день, казалось бы, многие вопросы по автоматической защите контактно-кабельной сети наземного городского электрического транспорта решены [1], все же остаются проблемы, которые нередко серьезным образом влияют как на надежность электроснабжения, так и на безопасность организации пассажирских перевозок наземным городским электротранспортом. Одной из таких проблем является возникновение малых токов короткого замыкания на контактной сети [2].

Данное физическое явление происходит на специальных частях контактной сети. В основном это пересечения «трамвай — троллейбус», «троллейбус — троллейбус», салазки разводных частей мостов города. Безусловно, подобные аварийные ситуации сами по себе не происходят, а возникают при прохождении подвижного состава трамваев или троллейбусов. Но в любом случае последствие одно — полный выход из строя специальных частей, а точнее — полное выгорание изделия и, как следствие, полная остановка пассажирского движения.

Это происходит из-за того, что автоматическая защита не видит (находясь в слепой зоне) аварийный режим, так как величина тока малого короткого замыкания, под влиянием которого происходит разрушение изделия контактной сети, сопровождается относительно небольшими значениями — от 300 до 600–650 А. То есть ток невысокий и является, по сути, нормальным при безаварийном режиме работы во время нахождения подвижного состава на контактной сети.

Таким образом, вопрос по разработке защиты контактной сети от малых токов короткого замыкания является актуальным.

В настоящее время в СПб ГУП «Горэлектротранс» существует защита контактной сети от токов перегрузки, в том числе от токов короткого замыкания (КЗ), и имеет следующие виды [3]:

1. Защита от перегрузки — срабатывает при достижении током значения в 2700 А. Время срабатывания составляет 0,08 секунды. Далее следует выдержка времени до 8 секунд и срабатывание автоматического повторного включения (АПВ). В случае повторного срабатывания защиты после АПВ оно блокируется, и линия остается отключенной до устранения причины возникновения тока перегрузки. После устранения неисправности линия возвращается в работу вручную — посредством энергодиспетчера.

2. Токо-временная защита контактной сети, которая реагирует на температуру нагрева провода.

Основной недостаток действующей защиты питающих линий заключаются в следующем [4]: ввиду сложности конфигурации тяговой сети и географического расположения ее элементов длины питающих линий для всех участков различны: от нескольких десятков метров до нескольких километров. Одинаковый ток срабатывания автоматических выключателей не обеспечивает требуемого уровня селективности, из-за чего защита может реагировать на КЗ в контактной сети за пределами длины питающей линии или не реагировать на КЗ в конце линии, где величина тока будет меньше тока срабатывания. В первом случае увеличивается износ оборудования из-за чрезмерного количества срабатываний выключателя, во втором — повреждение питающей линии и других агрегатов тяговой подстанции [5].

На рис. 1–11 представлены графики, описывающие процессы отключения фидеров функцией автоматического повторного включения (АПВ), системой токо-временной защиты (ТВЗ) и принудительно.

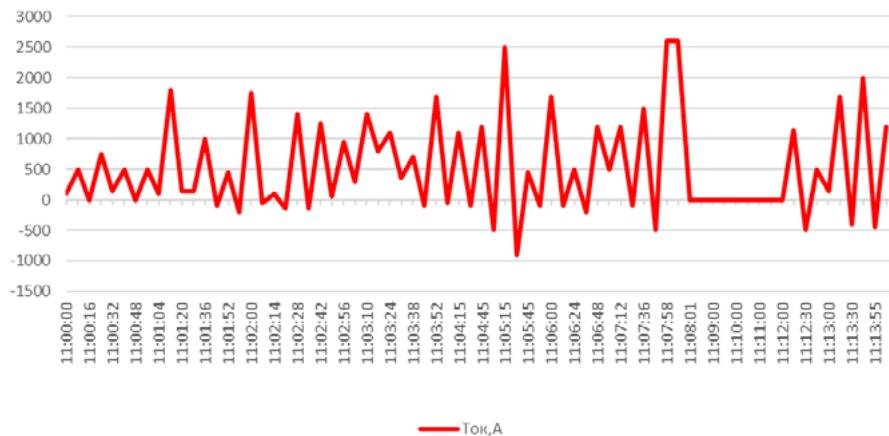


Рис. 1. График потребления тока со срабатыванием ТВЗ фидера «ЛЭМ3», зафиксированный комплексом телемеханики



Рис. 2. График напряжения в момент срабатывания ТВЗ фидера «ЛЭМ3», зафиксированный комплексом телемеханики

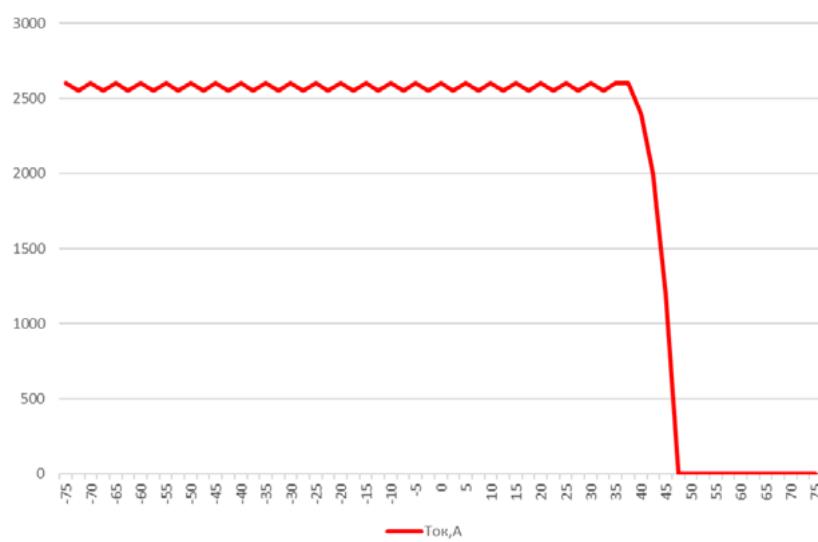


Рис. 3. График тока в момент срабатывания ТВЗ фидера «ЛЭМ3», зафиксированный комплексом телемеханики

При $I_{\text{уст}}$ фидера «ЛЭМЗ», равного 2800 А, на данном фидере значение тока было 2600 А в течении 6 секунд. Так как данное значение ниже, чем $I_{\text{уст}}$, сработала токо-временная защита.

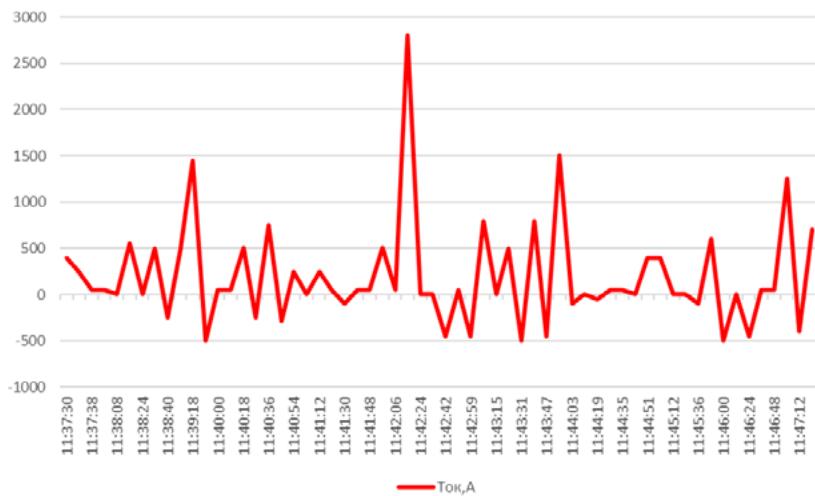


Рис. 4. График потребления тока со срабатыванием АПВ фидера «Дачный», зафиксированный комплексом телемеханики

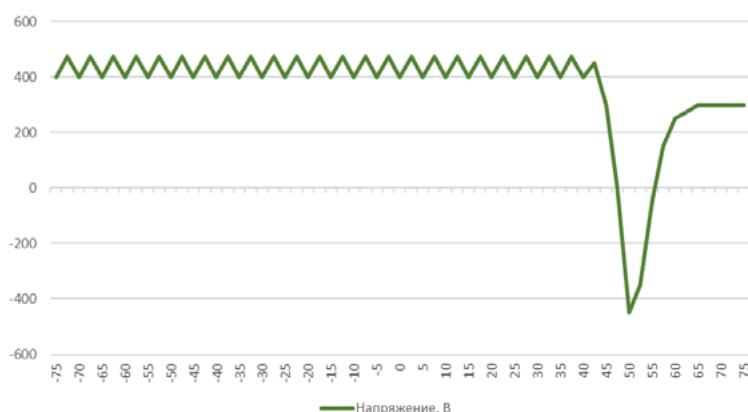


Рис. 5. График напряжения в момент срабатывания АПВ фидера «Дачный»

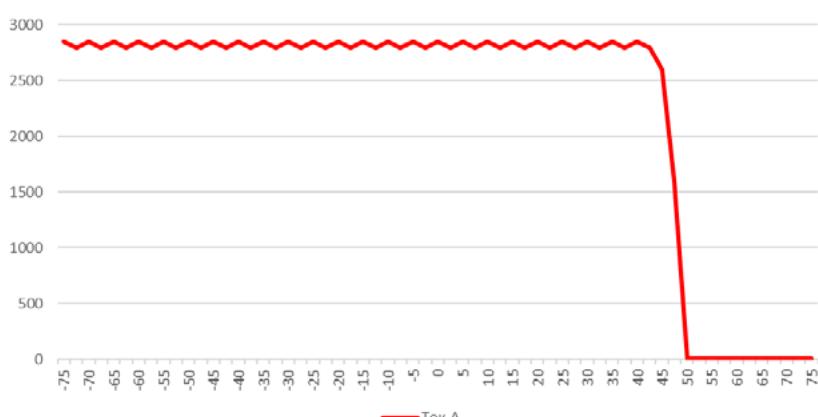


Рис. 6. График тока в момент срабатывания автоматического выключателя фидера «Дачный»

$I_{уст}$ фидера «Дачный» равен 2800 А. При достижении данного показателя сработал автоматический выключатель постоянного тока по $I_{уст}$.

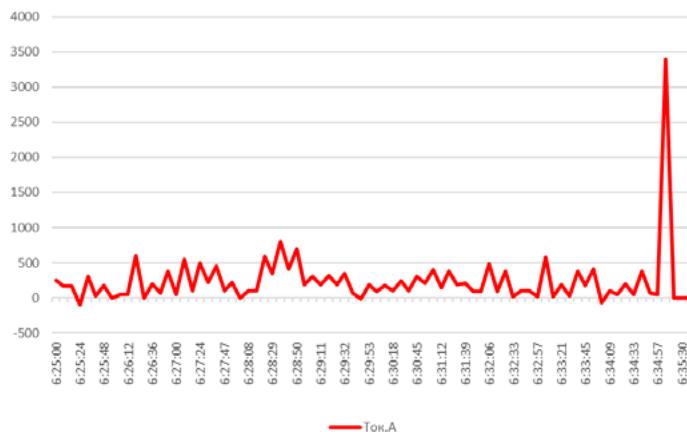


Рис. 7. График потребления тока со срабатыванием АПВ фидера «Егорова», зафиксированный комплексом телемеханики



Рис. 8. График напряжения в момент срабатывания АПВ фидера «Егорова»

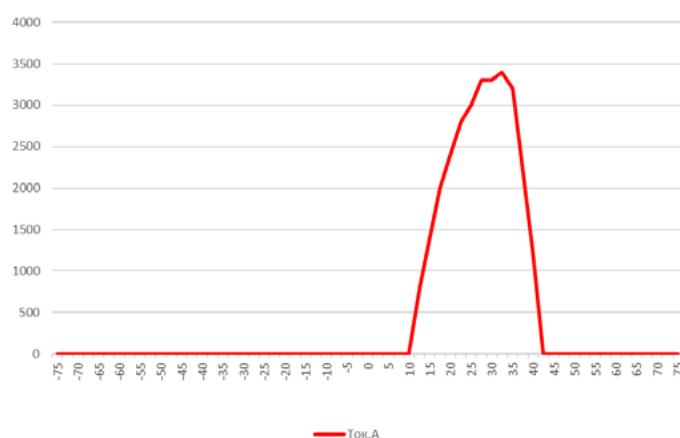


Рис. 9. График тока в момент срабатывания автоматического выключателя фидера «Егорова»

$I_{уст}$ фидера «Егорова» равен 2400 А. При превышении данного показателя сработал автоматический выключатель постоянного тока по $I_{уст}$.

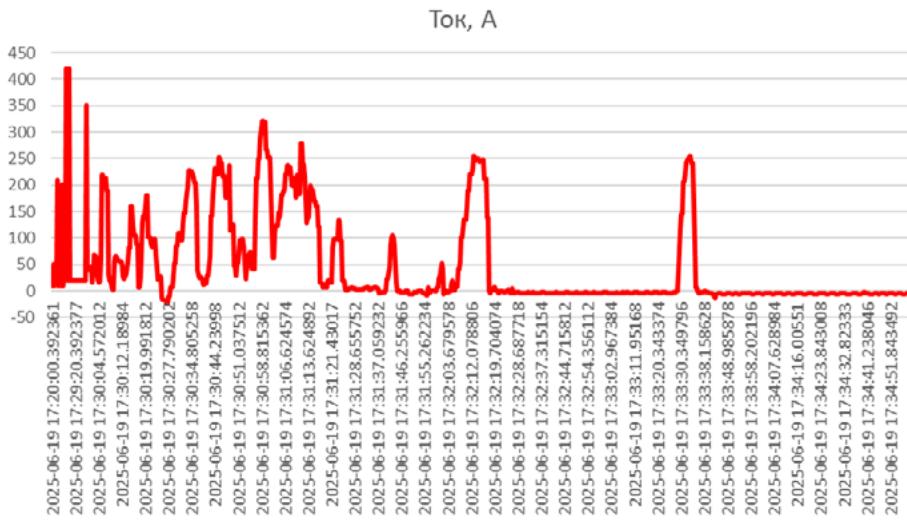


Рис. 10. График потребления тока фидера «Решетникова», зафиксированный комплексом телемеханики



Рис. 11. График напряжения в момент отключения диспетчером фидера «Решетникова»

$I_{уст}$ фидера «Решетникова» равен 2400 А. Автомат был отключен принудительно диспетчером РДП по команде с линии. Ток в момент отключения составил порядка 425 А. При этом наблюдалась длительная электрическая дуга на пересечении трамвай/троллейбус. В результате изделие вышло из строя (сгорело).

Анализ различных видов и причин коротких замыканий в контактной сети привел к необходимости выделения особой группы коротких замыканий малого тока, характеризующихся возникновением устойчивой электрической дуги (дуговой эффект). Дуговой эффект в контактной сети может возникнуть вследствие [6]:

- обрыва и падения контактного провода на подвижный состав или рельсы;
- перехлеста контактных проводов вследствие сильного ветра или внешнего воздействия;
- падения посторонних предметов на контактную сеть;
- неисправности токоприемников;
- пробоя изоляции в подвесной арматуре контактной сети;
- неисправности дугогасящих элементов контактной сети;
- неисправности подвижного состава;
- специфических погодных условий (сильный мороз, образование наледи);
- при нарушении своих действий (должностных инструкций) водителями, при управлении подвижным составом.

В некоторых случаях токи и время их действия в процессе возникновения дуговых эффектов, как правило, не достигают значений, при которых происходит срабатывание основных защит от коротких замыканий и токо-временной защиты, при этом негативные последствия длительного воздействия их на контактную сеть и подвижный состав могут быть необратимыми.

Малые значения токов короткого замыкания, сопровождающиеся дуговыми эффектами, не позволяют выявлять и анализировать их имеющимися техническими средствами [7]. Для более детального исследования поведения контактной сети и оборудования в момент возникновения коротких замыканий всех видов, включая короткие замыкания с малым током и дуговыми эффектами, принято решение о внедрении в опытную эксплуатацию на одной из тяговых подстанций ГЭТ быстродействующей системы регистрации аварийных процессов с одновременным расширением комплекса телемеханики в части повышения производительности и надежности сбора данных.

Опытная эксплуатация проводилась в 2024 г., однако принято решение продолжить ее в 2025 и 2026 гг. соответственно. Итоговая цель данных исследований — разработка алгоритма защиты контактной сети от малых токов короткого замыкания.

Промежуточные и итоговые результаты опытной эксплуатации будут опубликованы в последующих статьях.

Список источников

1. Горшков П. Ю. Контактные сети и воздушные линии электропередачи городского электротранспорта / П. Ю. Горшков, Н. Д. Ковалев, М. Ф. Бочаров. — М.: Транспорт, 2010. — 348 с.
2. Савин В. А. Электрооборудование и электрические установки наземного городского транспорта / В. А. Савин, Е. Н. Павлов. — Новосибирск: Наука, 2013. — 412 с.

3. Колесник Т. Р. Автоматизация защиты распределительных сетей / Т. Р. Колесник, О. В. Дубровская. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2015. — 264 с.
4. Максимова Е. В. Диагностика и мониторинг состояния контактных сетей городского электротранспорта / Е. В. Максимова, А. С. Маслов. — Самара: СамГУПС, 2018. — 216 с.
5. Сидоров Н. А. Методические основы проектирования и эксплуатации контактных сетей городского электрического транспорта / Н. А. Сидоров, А. Я. Петров. — Хабаровск: ХабарГУ, 2012. — 304 с.
6. Кондратьев В. В. Эксплуатационные характеристики и ремонт контактных сетей городского транспорта / В. В. Кондратьев, Н. В. Федоров. — Челябинск: ЧГАСУ, 2016. — 248 с.
7. Чернышов С. И. Релейная защита и автоматика распределительных сетей промышленного назначения / С. И. Чернышов, В. П. Сергеев. — Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2019. — 320 с.

Дата поступления: 24.06.2025

Решение о публикации: 20.07.2025

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

ЩЕРБАНЬ Александр Владимирович — начальник ОСП «Энергохозяйство»; en_gi@spbget.ru

АРХИПОВ Дмитрий Дмитриевич — заместитель начальника ПТО ОСП «Энергохозяйство»; digital5563@icloud.com

Justification for Protecting the Overhead Contact System of Urban Land Electric Transport from Low Short-Circuit Currents

A. V. Agunov¹, A. V. Shcherban², D. D. Arkhipov²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²SUE “Gorelectrotrans”, 15 Syzranskaya str., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Shcherban A. V., Arkhipov D. D. Justification for Protecting the Overhead Contact System of Urban Land Electric Transport from Low Short-Circuit Currents. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 28–36. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-28-36

Summary

Purpose: This paper aims to create an efficient system for protecting the overhead contact system of urban land electric transport from low short-circuit currents, which primarily occur at track intersections and from violations of rolling stock operation protocols. Despite existing protection measures, such incidents frequently result in severe consequences, including the total collapse of network segments and disruptions to passenger services. **Methods:** An analysis of existing feeder protection systems, identification of shortcomings within the existing protection framework, and the development of a new algorithm to detect low-power short circuits. **Results:** The obtained preliminary findings from experimental operations indicate the prospects for further research into low short-circuit currents. The introduction of rapid alarm registration systems facilitates the effective detection and elimination of threats associated with low short-circuit currents. Further tests are

planned for the coming years, with the ultimate goal of fully automating the detection and prevention of emergency situations in the contact network associated with low short-circuit currents. **Practical significance:** The practical significance of this research lies in its potential to significantly boost the reliability of power supply for urban transportation networks, reduce unexpected downtime of public transport, and minimize passenger safety risks. The results of the study have the potential for widespread adoption in the operational practices of urban electric transport enterprises. This would ensure uninterrupted operation of infrastructure and enhance the overall quality of public services.

Keywords: Urban electric transport, overhead contact network protection, short circuit, energy recuperation, monitoring.

References

1. Gorshkov P. Yu., Kovalev N. D., Bocharov M. F. *Kontaktnye seti i vozdushnye linii elektroperedachi gorodskogo elektrotransporta* [Contact Networks and Overhead Power Lines for Urban Electric Transport]. Moscow: Transport Publ., 2010, 348 p. (In Russian)
2. Savin V. A., Pavlov E. N. *Elektrooborudovanie i elektricheskie ustanovki nazemnogo gorodskogo transporta* [Electrical Equipment and Installations for Ground Urban Transport]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2013, 412 p. (In Russian)
3. Kolesnik T. R., Dubrovskaya O. V. *Avtomatizatsiya zashchity raspredelitel'nykh setey* [Automation of Protection for Distribution Networks]. Ekaterinburg: UGTU-UPI Publ., 2015, 264 p. (In Russian)
4. Maksimova E. V., Maslov A. S. *Diagnostika i monitoring sostoyaniya kontaktnykh setey gorodskogo elektrotransporta* [Diagnostics and Monitoring of the State of Urban Electric Transport Contact Networks]. Samara: SamGUPS Publ., 2018, 216 p. (In Russian)
5. Sidorov N. A., Petrov A. Ya. *Metodicheskie osnovy proektirovaniya i ekspluatatsii kontaktnykh setey gorodskogo elektricheskogo transporta* [Methodological Foundations of Design and Operation of Urban Electric Transport Contact Networks]. Khabarovsk: KhabarGU Publ., 2012, 304 p. (In Russian)
6. Kondrat'ev V. V., Fedorov N. V. *Ekspluatatsionnye kharakteristiki i remont kontaktnykh setey gorodskogo transporta* [Operational Characteristics and Repair of Urban Transport Contact Networks]. Chelyabinsk: ChGASU Publ., 2016, 248 p. (In Russian)
7. Chernyshov S. I., Sergeev V. P. *Releynaya zashchita i avtomatika raspredelitel'nykh setey promyshlennogo naznacheniya* [Relay Protection and Automation of Industrial Distribution Networks]. Saratov: Saratovskiy gos. tekhn. un-t Publ., 2019, 320 p. (In Russian)

Received: June 24, 2025

Accepted: July 20, 2025

Author's information

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Alexander V SHCHERBAN — Head of the SSE “Energokhozeystvo”; en_gi@spbget.ru

Dmitry D. ARKHIPOV — Production Department Deputy Head of the SSE “Energokhozeystvo”; digital5563@icloud.com