

Светимский В.В., Серебренников И.А., Куксов Н.Е., Безгубов В.А., Игнатко Д.В., Бардушко А.Ю., Пузина Е.Ю.

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЭП СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Аннотация. В данной статье рассматривается актуальная проблема энергосистемы – снижение потерь и затрат при передаче мощности на большие расстояния. В статье проводится технический, экономический и эксплуатационный анализ двух технологий: передачи переменного тока HVAC напряжением 500 кВ и 750 кВ и передачи постоянного тока HVDC напряжением 400 кВ для линии длиной 550 км и мощностью 1000 МВт между НВ АЭС и МС энергокольцом. Анализ характеристик указанных технологий передачи электроэнергии позволил выявить достоинства и недостатки обеих систем. Электрические расчеты обеспечили возможность выбора силового оборудования для подстанций и также марки и количество проводов линий электропередачи. Анализ рынка силового оборудования для передачи постоянного тока показал, что в России требуемое оборудование в настоящее время не производится. С целью развития отечественной промышленности по производству такого оборудования сформировано техническое задание с указанием основных параметров преобразовательных трансформаторов, выпрямителей, инверторов. Также рекомендовано использовать тиристорные регуляторы напряжения на 400 кВ. На основании технико-экономических расчетов удалось установить граничную длину линии, до которой наиболее выгодно применять переменный ток в ЛЭП сверхвысокого напряжения, а свыше которой оптимальным является использование ЛЭП постоянного тока. Для обоснования выбора приводятся результаты расчёта электрических параметров, сравниваются инвестиционные и операционные затраты, оцениваются надёжность, управляемость и интеграция в сеть. На основе результатов исследования сформулированы рекомендации для выбора оптимальной технологии.

Ключевые слова: система электроснабжения, линии электропередачи, сверхвысокое напряжение.

Svetimsky V.V., Serebrennikov I.A., Kuksov N.E., Bezgubov V.A., Ignatko D.V., Bardushko A.Yu., Puzina E.Yu.

Irkutsk State Transport University, Irkutsk

SELECTING THE OPTIMAL OPTION FOR CONSTRUCTING ULTRA-HIGH VOLTAGE POWER LINES

Annotation. This article discusses an urgent problem of the energy system – reducing losses and costs when transmitting power over long distances. The article provides a technical, economic and operational analysis of two technologies: 500 kV and 750 kV HVAC alternating current transmission and 400 kV HVDC direct current transmission for a 550 km long and 1,000 MW line between the NV NPP and the MS power ring. An analysis of the characteristics of these power transmission technologies revealed the advantages and disadvantages of both systems. Electrical calculations provided the opportunity to select power equipment for substations and also the brand and number of wires of power transmission lines. An analysis of the market for DC power transmission equipment has shown that the required equipment is not currently being manufactured in Russia. In order to develop the domestic industry for the production of such equipment, a technical specification has been formed indicating the main parameters of converter transformers, rectifiers, and inverters. It is also recommended to use 400 kV thyristor voltage regulators. Based on technical and economic calculations, it was possible to establish the boundary length of the line, up to which it is most advantageous to use alternating current in ultrahigh voltage transmission lines, and above which it is optimal to use direct current transmission lines. To justify the choice, the results of calculating electrical parameters are presented, investment and operating costs are compared, reliability, manageability and integration into the network are evaluated. Based on the results of the study, recommendations were formed for choosing the optimal technology.

Keywords: power supply system, power transmission lines, ultra-high voltage.

Введение

Передача электроэнергии на большие расстояния играет ключевую роль в обеспечении устойчивости и эффективности функционирования энергосистемы. В современных условиях

в соответствии с приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 29.11.2024 №2328 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025 – 2030 годы» возрастает потребность в передаче значительных мощностей от крупных генерирующих источников (например, атомных электростанций) к удалённым центрам потребления. При этом, критически важными становятся вопросы выбора оптимальной технологии передачи энергии. Стоит отметить, что в настоящее время в системах внешнего электроснабжения наблюдается дефицит мощности, в том числе и связанный с организацией на российских железных дорогах движения тяжеловесных поездов большой массы и даже сдвоенных с меньшими интервалами [1-5], а это в свою очередь может негативно сказаться и на работе устройств системы тягового электроснабжения [6-7].

На сегодняшний день наиболее распространёнными являются два типа систем высоковольтной передачи: HVAC (High Voltage Alternating Current — передача переменного тока высокого напряжения) и HVDC (High Voltage Direct Current — передача постоянного тока высокого напряжения) [8-10]. Каждая из них имеет свои преимущества и ограничения, зависящие от условий применения: расстояния, объёма передаваемой мощности, структуры энергосистемы и требований к управляемости потоками мощности.

В данной работе рассматривается вопрос выбора оптимального варианта линии передачи электрической энергии от НВ атомной электростанции до МС энергокольца, протяжённостью 550 км и расчётной мощностью 1000 МВт. Целью исследования является сравнение двух технологий (HVAC и HVDC) на основе технических, экономических и эксплуатационных параметров, а также выявление наиболее рационального решения для данного конкретного проекта.

Необходимо выбрать технологию, обеспечивающую:

1. Потери в линии $\leq 5\%$ от передаваемой мощности.
2. Инвестиции на инфраструктуру и оборудование в рамках бюджета.
3. Управление потоками мощности и возможность быстрого реагирования на изменение нагрузки.
4. Простоту технической эксплуатации и ремонта.

Выбор оптимального варианта строительства ЛЭП сверхвысокого напряжения

В настоящее время в рамках задачи исследования силами коллектива авторов данной работы проведены проектные расчеты для ЛЭП 500 кВ и 750 кВ переменного тока и ЛЭП 400 кВ постоянного тока. Структурные схемы данных ЛЭП сверхвысокого напряжения приведены на рис. 1.



Рис. 1. Структурные схемы ЛЭП сверхвысокого напряжения:

А – переменного тока;

В – постоянного тока:

1 – электростанция; 2 - повышающий трансформатор (автотрансформатор); 3 - понижающий трансформатор (автотрансформатор); 4 – нагрузка; 5 – выпрямитель; 6 - инвертор

В ходе исследования материалов по ЛЭП сверхвысокого напряжения на постоянном и переменном токе появилась возможность выделить, как их достоинства, так и недостатки.

К достоинствам ЛЭП на переменном токе можно отнести следующее:

1. Простота и меньшая стоимость трансформирования электроэнергии.
2. Распространённость и наличие инфраструктуры для передачи переменного тока.
3. Наличие отечественных производителей оборудования.

В свою очередь, к отдельным недостаткам можно отнести:

1. Необходимость синхронизации систем между различными источниками электроэнергии.
2. Наличие потерь, связанных с излучением электромагнитных волн и наведённым напряжением.

К достоинствам ЛЭП на постоянном токе можно отнести следующее:

1. Возможность передавать большие объёмы электроэнергии на большие расстояния с меньшими потерями, как правило, при длине линии более 700 км.
2. Системы постоянного тока не требуют синхронизации между собой при соединении нескольких независимых систем в одну.

В свою очередь, к отдельным недостаткам можно отнести:

1. Необходимость преобразования постоянного тока в переменный и обратно.
2. Преобразователи тока дороги и имеют ограниченную перегрузочную способность.
3. На малых расстояниях потери в преобразователях могут быть больше, чем в аналогичной по мощности ЛЭП переменного тока.

С целью обоснованного выбора оптимального варианта ЛЭП сверхвысокого напряжения в конкретных условиях - для передачи электрической энергии от НВ атомной электростанции до МС энергокольца, протяжённостью 550 км и расчётной мощностью 1000 МВт, выполнен расчет рабочего максимального тока для каждого из трех исследуемых вариантов и на его базе, а также класса напряжения линии, величины передаваемой мощности и с учетом структурной схемы передачи выбрано силовое оборудование, как для ЛЭП переменного, так и постоянного тока [11].

Для варианта ЛЭП 500 кВ переменного тока: для преобразования электроэнергии в связи с отсутствием в промышленном производстве силовых трансформаторов на необходимую мощность и класс напряжения принято решение использовать в работе два автотрансформатора (АТ) марки АТДЦТН-500000/500/220, включенных параллельно, и также аналогичный третий АТ в резерве. В качестве проводов ВЛ, исходя из расчетного тока, который составил 1154 А, допустимой экономической плотности, проверки в аварийном режиме, выбрано 3 провода марки АС-500.

Для варианта ЛЭП 750 кВ переменного тока: по аналогичным причинам принято решение использовать в работе две группы однофазных автотрансформатора марки АОДЦТН-267000/750/220, включенных параллельно, и третью группу в резерве. В качестве проводов ВЛ, исходя из расчетного тока, который составил 769 А, допустимой экономической плотности, проверки в аварийном режиме, выбрано 5 проводов марки АС-300.

Для варианта ЛЭП 400 кВ постоянного тока: в связи с отсутствием отечественного силового оборудования на заданный класс напряжения принято решение о необходимости разработки технического задания на проектирование и создание автотрансформатора мощностью 1 ГВт с преобразованием напряжения с 220 кВ на 330 кВ и также с использованием тиристорного регулятора напряжения на 400 кВ. В качестве проводов ВЛ исходя из расчетного тока, который составил 2500 А, допустимой экономической плотности, проверки в аварийном режиме, выбрано 5 проводов марки АС-500.

Для возможности регулировки напряжения предлагаем использовать тиристорный регулятор напряжения (ТРН) на 400 кВ [12], поскольку расчетное значение напряжения на обмотке, соединённой с выпрямителем составляет 297 кВ, но такой уровень напряжения не совпадает с номинальными напряжениями, действующими в Российских электрических сетях (рис. 2).

Преимущества ТРН:

1. Высокая мощность - способность работать с напряжением 400 кВ позволяет использовать ТРН в столь мощной системе.
2. Надежность и высокая устойчивость к перегрузкам и коротким замыканиям.
3. Точность и плавность регулирования – тиристоры обеспечивают высокую точность регулирования, возможность точного поддержания заданных параметров напряжения.

Эти преимущества делают тиристорный регулятор напряжения на 400 кВ оптимальным выбором для управления и стабилизации высоковольтных систем в крупных промышленных комплексах и энергетических установках.

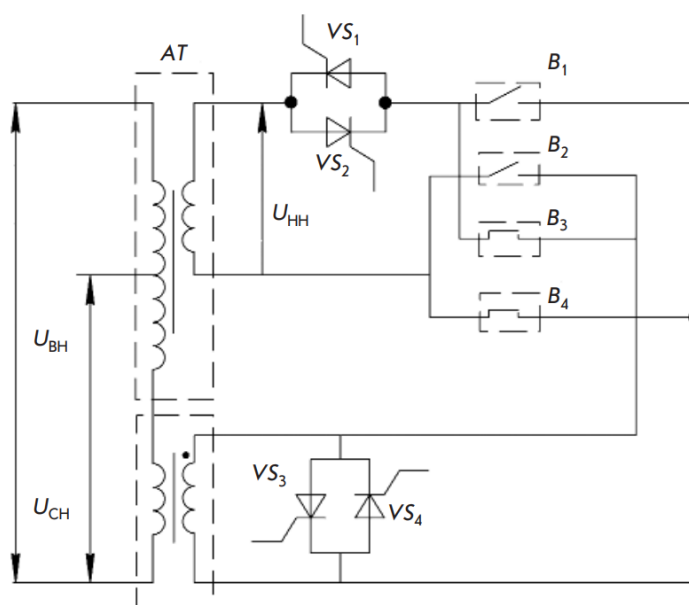


Рис. 2. Тиристорный регулятор напряжения

При анализе возможных схем выпрямления преобразователей нами выявлено что мостовая тиристорная схема (рис. 3) позволяет получить более качественное выпрямленное напряжение, обеспечивает более равномерное распределение нагрузки по плечам преобразователя.

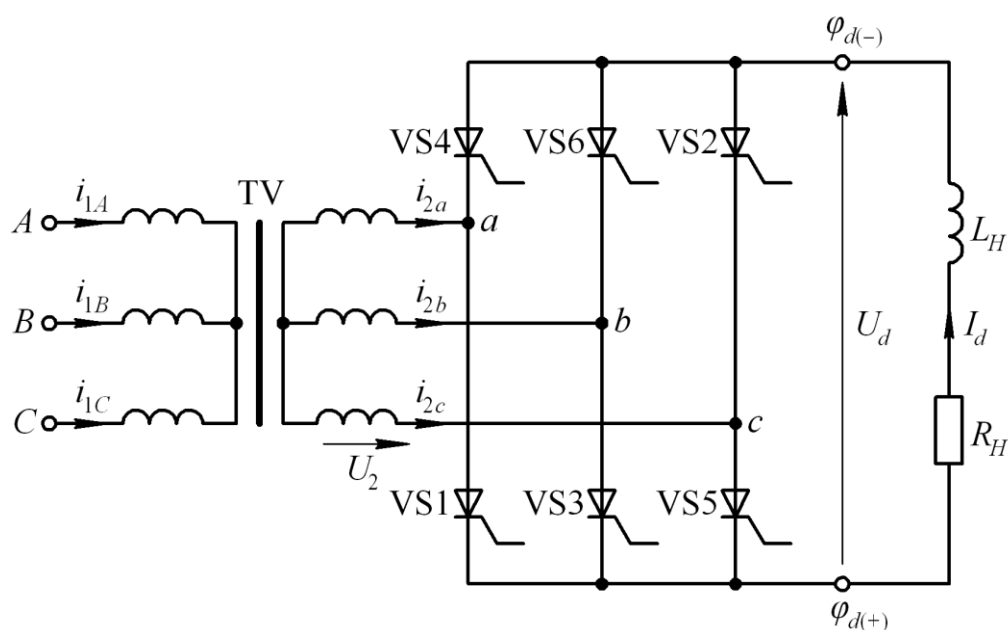


Рис. 3. Мостовая тиристорная схема выпрямления

Также для модернизации повышающих и понижающих подстанций в связи с большой стоимостью аренды земли в МС регионе рекомендуем использовать КРУЭ-750 кВ, КРУЭ-500 кВ, КРУЭ-220 кВ (рис. 4).

Преимущества использования КРУЭ:

1. Компактность установки.
2. Модульная конструкция упрощает монтаж и обслуживание, так как устройство делится на типовые отсеки, готовые к быстрой сборке.
3. Повышенная безопасность для обслуживающего персонала.
4. Пожаробезопасность.
5. Защиты контактных соединений от атмосферного воздействия.

В результате проведения технико-экономического расчета определены капитальные вложения [13-15], потери электрической энергии в стали, меди и в питающей линии протяженностью 550 км, а также другие виды затрат на эксплуатацию передачи постоянного и переменного тока и, в конечном итоге, приведенные затраты на первый год эксплуатации, что обеспечивает возможность сравнения ЛЭП переменного и постоянного тока (табл. 1).

Таблица 1

Технико экономические сравнение линий передачи сверхвысокого напряжения

Показатели	750 кВ переменного тока	500 кВ переменного тока	400 кВ постоянного тока
Капитальные вложения на ПС И ВЛ, млрд. руб.	80,4	58	73
Потери мощности в стали $P_{ст}, кВт$	200	147	270
Потери мощности в линии, $\Delta P_{л}, кВт$	600	470	1080
Потери мощности в меди, $P_{м}, кВт$	17787	97240	187500
Потери электроэнергии ΔW , млн. кВт*час	112,074	587	1252,2
Стоимость потерь электроэнергии, $C_{\Delta W}$, млрд. руб.	0,728	3,819	8,139
Издержки на ремонт и обслуживание, $I_{рем. и обс.}$, млрд. руб.	5,4	3,9	4,9
Приведенные затраты, $Z_{г}$, млрд. руб.	14,17	13,5	20,34

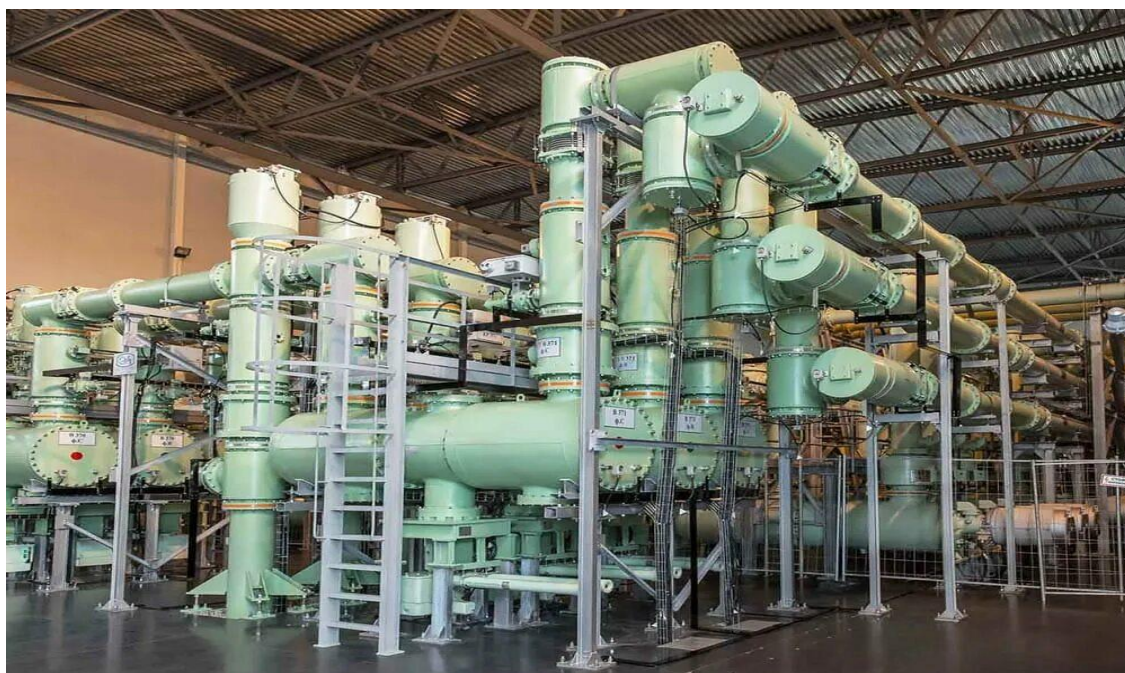


Рис.4. КРУЭ 500 кВ

Из рассматриваемых ЛЭП на данное расстояние рациональнее возвести ЛЭП 500 кВ переменного тока, так как этот вариант выигрывает по потерям в линии, по капитальным вложениям и приведённым затратам. Согласно проведенного расчета линии постоянного тока следует рассматривать на расстояние более 724 км, так как в этом случае они предпочтительны по окупаемости в связи с меньшими потерями электроэнергии. Таким образом, из-за отсутствия отечественных производителей силового оборудования и ряда своих недостатков, является нецелесообразным использование линий сверхвысокого напряжения постоянного тока на расстояние менее 724 км.

Полученные выводы хорошо совпадают с результатами исследований ряда зарубежных и отечественных ученых. В частности, на рис. 5 приведена зависимость эффективности применения передачи постоянного и переменного тока от длины линии, полученная российским ученым Зотиным О. и приведенная в [16].

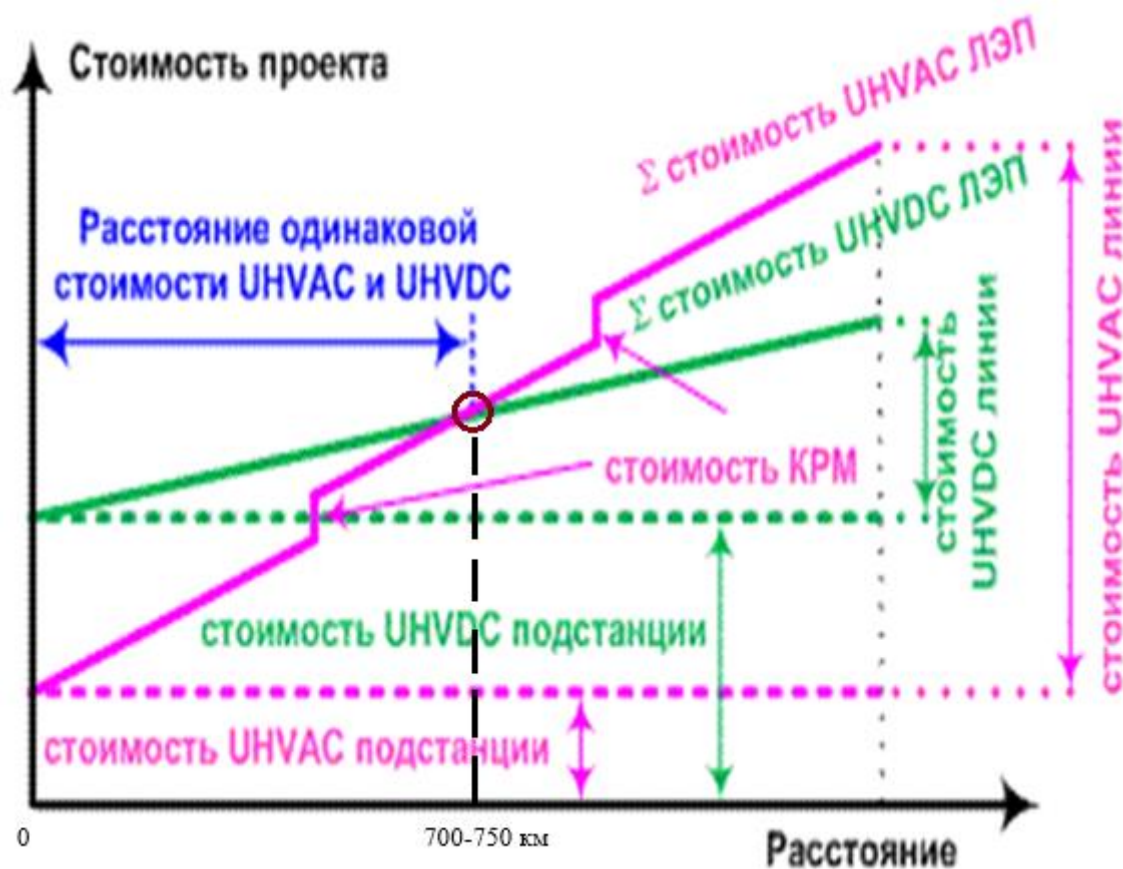


Рис. 5. Зависимость эффективности применения передачи постоянного и переменного тока от длины линии

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что обе технологии – передача сверхвысокого напряжения постоянного и переменного тока – способны обеспечить надёжную передачу электроэнергии при мощности 1000 МВт и протяжённости линии 550 км. Однако HVDC обладает технологическими преимуществами, особенно актуальными в долгосрочной перспективе более низкими потерями при передаче на расстояния более 724 км. Всё делает его привлекательным для регионов с дефицитом мощности, высокими требованиями к надёжности и гибкости сети. Если целью является минимизация капитальных затрат и упрощение экс-

плутации — следует выбирать HVAC. Если же приоритетом является эффективность, масштабируемость и технологическая гибкость — HVDC представляется более перспективным решением, особенно в условиях перспективного развития электроэнергетики РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Разработка предложений по устранению лимитирующих межподстанционных зон при развитии Восточного полигона // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта: сборник трудов Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2024. С. 61–65.
2. Куцый А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Анализ эффективности применения организационных и технических способов повышения пропускной способности тяговой сети двухпутного горно-перевального участка // Молодая наука Сибири. 2022. № 3 (17). С. 56-63.
3. Puzina E.Yu., Krapivin M.I. Modeling The Power Supply System of The Eastern Polygon to Design Technical Solutions for The Development of a Throughput Capacity // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы / Сборник докладов III Международной научной конференции. Минск. 2025. С. 239-245.
4. Бардушко А.Ю., Куцый А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурим-Киренга на перспективу // Молодая наука Сибири. 2023. №4 (22). С. 182-193.
5. Крапивин М.И., Урлапов С.С., Пузина Е.Ю. Модернизация системы электроснабжения участка Порт Байкал – Маритуй Кругобайкальской железной дороги // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири / Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иркутск. 2024. С. 164-168.
6. Урлапов С.С., Крапивин М.И. Анализ повреждаемости электрооборудования тяговых подстанций на Восточно-Сибирской железной дороге. // Молодая наука Сибири. 2023. №2 (20). С. 106-114.
7. Пузина Е.Ю., Крапивин М.И., Урлапов С.С. Предложения по внедрению системы автоматического пожаротушения лафетного типа для цифровой тяговой подстанции // Образование – наука – производство. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Чита, 2023. С. 285-292.
8. Мисриханов М.Ш., Седунов В.Н. К 45-летию начала освоения электропередач сверхвысокого напряжения // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ. Вып. 4. М: Энергоатомиздат, 2001. С. 5-8.
9. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: Торус-Пресс, 2011. – 312 с.
10. Пузина Е.Ю., Крапивин М.И., Урлапов С.С., Макаренко Ю.Н. Применение искусственного интеллекта в железнодорожной электроэнергетике // Трансформация транспорта и образования: труды Всероссийской научно-практической конференции КРИИЖТ ИрГУПС, посвященной 130-летию транспортного образования в Сибири. – Красноярск, 2024. – С. 361-365.
11. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.
12. Крысанов В.Н., Гамбург К.С. Выбор силовой части высоковольтных тиристорных регуляторов напряжения URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-silovoy-chasti-vysokovoltnyh-tiristornyh-regulyatorov-napryazheniya/viewer> (дата обращения: 23.05.2025).
13. Паспорт Программы инновационного развития ПАО «Федеральная сетевая компания – Россети» на период 2024-2029 г.г. с перспективой до 2035 года. URL: https://megapnorm.ru/mega_doc/norm_update_26042025/perechen/0/skhema_i_programma_razvitiya_elektroenergeticheskikh_sistem.html (дата обращения: 25.05.2025).
14. ПАО «Россети» <http://www.rosseti.ru/> (дата обращения: 03.05.2025).

15. Минэнерго РФ. Официальные тарифы и справочные данные по стоимости оборудования (доступ 2025). URL: <https://minenergo.gov.ru/> (дата обращения: 25.05.2025).
16. Зотин О. В преддверии возрождения постоянного тока // Силовая электроника. 2013. № 4. С. 15-20.

REFERENCES

1. Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Development of proposals for the elimination of limiting substation zones in the development of the Eastern landfill // Research and development of rail and road transport: proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Yekaterinburg, 2024. pp. 61-65.
2. Kutsy A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Analysis of the effectiveness of organizational and technical methods for increasing the capacity of the traction network of a double-track mining and transshipment area // Young Science of Siberia. 2022. No. 3 (17). pp. 56-63.
3. Puzina E.Yu., Krapivin M.I. Modeling The Power Supply System of The Eastern Polygon to Design Technical Solutions for The Development of a Throughput Capacity // Sustainable Energy development of the Republic of Belarus: status and prospects / Collection of reports of the III International Scientific Conference. Minsk. 2025. pp. 239-245.
4. Bardushko A.Yu., Kutsy A.P. Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim-Kirenga railway for the future // Young Science of Siberia. 2023. No. 4 (22). pp. 182-193.
5. Krapivin M.I., Uralpov S.S., Puzina E.Yu. Modernization of the power supply system for the Baikal – Maritui Port section of the Circum-Baikal Railway // Improving the efficiency of energy production and use in Siberia / Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Irkutsk. 2024. pp. 164-168.
6. Uralpov S.S., Krapivin M.I. Analysis of damage to electrical equipment of traction substations on the East Siberian Railway. // Young Science of Siberia. 2023. No. 2 (20). pp. 106-114.
7. Puzina E.Yu., Krapivin M.I., Uralpov S.S. Proposals for the introduction of a carriage-type automatic fire extinguishing system for a digital traction substation // Education – science – production. Materials of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation). Chita, 2023. pp. 285-292.
8. Misrikhanov M.Sh., Sedunov V.N. On the 45th anniversary of the beginning of the development of ultra-high voltage power transmission // Improving the efficiency of power systems. Proceedings of the IGEU. Issue 4. Moscow: Energoatomizdat, 2001. pp. 5-8.
9. Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G. Application of flexible (controlled) AC power transmission systems in power systems. Moscow: Torus Press, 2011. 312 p.
10. Puzina E.Yu., Krapivin M.I., Uralpov S.S., Makarenko Yu.N. Application of artificial intelligence in the railway electric power industry // Transformation of transport and education: proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference CRIIZHT IrGUPS, dedicated to the 130th anniversary of transport education in Siberia. – Krasnoyarsk, 2024. – pp. 361-365.
11. Handbook on the design of electrical networks / edited by D. L. Faybisovich. – 4th ed., revised and add. – M. : ENAS, 2012. – 376 p.
12. Krysanov V.N., Hamburg K.S. The choice of the power part of high-voltage thyristor voltage regulators URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-silovoy-chasti-vysokovoltnyh-tiristornyh-regulyatorov-napryazheniya/viewer> (date of request: 05/23/2025).
13. Passport of the Innovative Development Program of PJSC "Federal Grid Company – Rosseti" for the period 2024-2029 with a view to 2035. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm_update_26042025/perechen/0/skhema_i_programma_razvitiya_elektroenergeticheskikh_sistem.html (date of application: 05/25/2025).
14. PJSC ROSSETI <http://www.rosseti.ru/> (date of request: 05/03/2025).
15. Ministry of Energy of the Russian Federation. Official tariffs and reference data on the cost of equipment (access 2025). URL: <https://minenergo.gov.ru/> (date of application: 05/25/2025).
16. Zotin O. In anticipation of the revival of direct current // Power electronics. 2013. No. 4. pp. 15-20.

Информация об авторах

Светимский Виталий Владимирович – студент гр. СОД.1-22-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: svetimskiy04@mail.ru

Серебренников Илья Андреевич – студент гр. СОД.1-22-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ilya.serebrennikov.2004@inbox.ru

Куксов Никита Евгеньевич – студент гр. СОД.1-22-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: nikita.cuksov@yandex.ru

Безгубов Валерий Александрович – студент гр. СОД.1-22-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: valerabezgubov@gmail.com

Игнатко Дмитрий Васильевич – студент гр. СОД.1-22-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: dignatko@list.ru

Бардушко Александр Юрьевич – студент гр. СОД.1-21-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: aleksandr.bardushko@yandex.ru

Пузина Елена Юрьевна – к. т. н., доцент кафедры Электроэнергетика транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: lena-rus05@mail.ru

Authors

Svetimsky Vitaliy Vladimirovich – student g. SOD.1-22-1, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: svetimskiy04@mail.ru

Serebrennikov Il'ya Andreevich – student g. SOD.1-22-1, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ilya.serebrennikov.2004@inbox.ru

Kuksov Nikita Evgen'evich – student g. SOD.1-22-1, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: nikita.cuksov@yandex.ru

Bezgubov Valery Aleksandrovich – student g. SOD.1-22-1, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: valerabezgubov@gmail.com

Ignatko Dmitry Vasil'evich – student g. SOD.1-22-1, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: dignatko@list.ru

Bardushko Aleksandr Yur'evich – student g. SOD.1-21-1, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aleksandr.bardushko@yandex.ru

Elena Yur'evna Puzina – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: lena-rus05@mail.ru