

Оптимизация режимов работы системы тягового электроснабжения на участке обхода тоннеля

Е.Ю. Пузина✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

Резюме

В перспективе на 2030 г. планируется существенное увеличение грузооборота по Восточному полигону и, в частности, по Байкало-Амурской магистрали. Поскольку эта дорога имеет достаточно сложный профиль пути с подъемами, достигающими 16–17 %, и множеством тоннелей в горных массивах между станциями, на отдельных ее участках возникает проблема ограничения пропускной способности системы тягового электроснабжения при пропуске тяжеловесных поездов. Для организации бесперебойного движения поездов по участкам данной дороги в случае вывода в ремонт имеющихся, особенно протяженных, тоннелей, а также с учетом роста количества и масс поездов в будущем, актуальной задачей является осуществление мер по оптимизации режимов работы системы тягового электроснабжения подобных участков. В статье методом имитационного моделирования с применением программно-вычислительного комплекса «Кортэс» выполнена оценка предлагаемых мер усовершенствования системы тягового электроснабжения участка обхода СМ-тоннеля – одного из наиболее протяженных в России. Сравнительный анализ рассмотренных мероприятий позволил предложить к реализации комплекс средств усиления: устройство продольной компенсации реактивной мощности на двух концевых тяговых подстанциях, питающих тяговую сеть участка обхода тоннеля, и увеличение сечения отсасывающего провода на тяговой подстанции, расположенной на участке с наибольшим подъемом вдоль всего обхода. Эти изменения позволят поднять напряжение в контактной сети до минимально допустимого и избежать перегрева отсасывающего провода и в совокупности позволят решить поставленную задачу по обеспечению перспективной пропускной способности исследуемого участка.

Ключевые слова

система тягового электроснабжения, оптимизация режимов, обход тоннеля, устройство продольной компенсации, увеличение сечения отсасывающего провода

Для цитирования

Пузина Е.Ю. Оптимизация режимов работы системы тягового электроснабжения на участке обхода тоннеля / Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 42–53. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).42-53.

Информация о статье

поступила в редакцию: 11.11.2024 г.; поступила после рецензирования: 04.12.2024 г.; принята к публикации: 05.12.2024 г.

Optimization of operation modes of the traction power supply system at the tunnel bypass site

E.Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

Abstract

In the near future up to 2030, it is planned to significantly increase cargo turnover along the Eastern polygon, and in particular along the Baikal-Amur Railway. Since this road has a rather complex track profile with ascents reaching 16–17%, and many tunnels to reduce the distances between stations, in some of its sections there is a problem of limiting the capacity of the traction power supply system when passing heavy trains. In order to organize uninterrupted train traffic along sections of this road in the event of the withdrawal of existing, especially long, tunnels for repair, and also, given the increase in the number and mass of trains in the future, an urgent task is to develop measures to optimize the operating modes of the traction power supply system for such sections. In this work, by the method of simulation modeling using the «Kortes» software and computing complex, an assessment of the proposed measures for optimizing the traction power supply system of the bypass section of the SM tunnel, one of the longest in Russia, was carried out. A comparative analysis of the considered measures made it possible to propose a set of reinforcement tools for implementation: devices for longitudinal compensation of reactive power at two terminal traction substations feeding the traction network of the bypass section and an increase in the cross section of the suction wire at the traction substation located in the section with the greatest rise along the entire bypass. These measures will allow to raise the voltage in the contact network to the minimum permissible and avoid overheating of the suction wire and, in total, will make it possible to solve the task of ensuring the prospective throughput of the studied area.

Keywords

traction power supply system, optimization of modes, tunnel bypass, longitudinal compensation device, increasing the cross section of the suction wire

For citation

Puzina E.Yu. Optimizatsiya rezhimov raboty sistemy tyagovogo electrosnabzheniya na uchastke obkhoda tonnelya [Optimization of operation modes of the traction power supply system at the tunnel bypass site]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 42–53. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).42-53.

Article Info

Received: November 11, 2024; Revised: December 4, 2024; Accepted: December 5, 2024.

Введение

В послании Федеральному собранию 29 февраля 2024 г. Президент РФ В.В. Путин анонсировал запуск третьего этапа развития Байкало-Амурской (БАМ) и Транссибирской магистралей. Реализация проекта позволит увеличить провозную способность магистралей до 210 млн т, что на 37 млн т больше текущих показателей.

БАМ – уникальная железнодорожная линия, одна из крупнейших в мире. Скованная горными массивами и реками, участками вечной мерзлоты, трасса магистрали пролегает по территориям сразу шести регионов России (Иркутская область, Бурятия, Забайкальский край, Якутия, Амурская область и Хабаровский край).

Развитие БАМа играет важнейшую стратегическую роль в экономике страны по нескольким аспектам:

1. Транспортная связь. Дорога обеспечивает железнодорожное сообщение центральных регионов России с Тихоокеанским побережьем, разгружает движение Транссибирской магистрали.

2. Развитие регионов присутствия. Активизация экономической деятельности на территориях регионов БАМа и приграничных территориях. БАМ проходит через регионы, богатые природными ресурсами, включая золото, уголь, нефть и газ.

3. Транспортировка сырья до потребителей. Обеспечение более равномерного развития страны и более эффективного использования ресурсов.

4. Развитие туризма. БАМ проходит через уникальные природные ландшафты. Усовершенствование магистрали и инфраструктуры вдоль нее создает условия для привлечения внутренних туристов.

Таким образом, развитие БАМа стимулирует экономику регионов, облегчает транспор-

тировку грузов и пассажиров, создает новые рабочие места и привлекает инвестиции. В целом магистраль играет ключевую роль в инфраструктурном развитии Российской Федерации и способствует сбалансированному и устойчивому экономическому росту страны [1, 2].

Однако отдельные участки данной дороги являются «узким местом» с точки зрения пропускной способности системы тягового электроснабжения (СТЭ) [3, 4]. К таким относится и так называемый обход СМ-тоннеля.

Целью данной работы является разработка технических решений по оптимизации режимов работы СТЭ на участке обхода СМ-тоннеля, что поможет решить проблему его пропускной способности.

Постановка задачи исследования

СМ-тоннель проложен в условиях вечной мерзлоты. Серьезную проблему в его эксплуатации вызывают обильные подземные воды. Он отличается уникально большой протяженностью – более 15 км. При этом порядка 400 м тоннеля проходят под пониженной кровлей скальных пород. Высока сейсмичность в месте расположения – девять баллов.

На время строительства СМ-тоннеля был проложен временный обход для осуществления перевозок грузов и пассажиров. Его длина составляла 24,6 км, при этом профиль пути отличался более чем серьезными уклонами – до 40 %. Поэтому перевозка грузов была организована поездами, содержащими небольшое количество вагонов, а пассажиров и вовсе перевозили через перевал автобусным транспортом.

Во второй половине 80-х гг. прошлого века этот переход демонтировали и построили новый протяженностью 64 км. Этот обход отличался наличием большого числа серпантинных и виадуктов. Также были построены два петлевых тоннеля. В результате скорость движения

поездов достигала максимум 20 км/ч, был высок риск схода лавин. Кроме того, приходилось активно использовать подталкивание поездов. Эксплуатирующие этот обход организации несли значительные расходы по его содержанию. Большое внимание уделялось обеспечению безопасности движения поездов.

Работы по подготовке строительства тоннеля продолжались с 1975 по 1977 г. При этом в ней участвовали около 4,9 тыс. чел. О масштабах работ говорят следующие факты: общий объем переработанного грунта – свыше 2 000 000 м³; количество уложенного железобетона – порядка 700 000 м³; масса возведенных металлоконструкций – 70 000 т.

Завершающая сбойка была осуществлена в марте 2001 г. Первый поезд прошел в декабре 2001 г., но окончательно СМ-тоннель был открыт только в декабре 2003 г.

Ввод в эксплуатацию данного тоннеля привел к существенному сокращению протяженности пути движения поездов – на 33 км, время движения по этому участку сократилось на 135 мин., появилась возможность осуществлять движение поездов без подталкивания. Существенно сократились эксплуатационные расходы и вырос уровень безопасности движения поездов. Вместе с тем ввод в эксплуатацию данного тоннеля не означал отказ от частичного движения поездов по обходному пути. Обход можно было более активно использовать

при переориентации части грузопотока с главного хода Транссибирской магистрали в направлении БАМа, что и заложено в программе развития Восточного полигона, а также во время ремонта СМ-тоннеля, при капитальном ремонте которого обход должен быть задействован максимально.

Поскольку в настоящее время реализуется третий этап развития Восточного полигона, то актуальной задачей является развитие пропускной способности и оптимизация режимов работы СТЭ на участке обхода СМ-тоннеля БАМа.

Анализ пропускной способности системы тягового электроснабжения обхода тоннеля

СТЭ участка обхода СМ-тоннеля включает в себя пять тяговых подстанций (ЭЧЭ): ЯН, АН, ПР, ОК, УЛ, причем первая и последняя ЭЧЭ включены в расчет с целью полноценной нагрузки подстанций АН и ОК. Таким образом, общая протяженность исследуемого участка составляет 133 км. По всей длине участка отсутствуют посты секционирования. Также отметим тот факт, что на межподстанционных зонах (МПЗ) ЯН – АН, АН – ПР и ПР – ОК используется СТЭ 1×25 кВ и трехфазные тяговые силовые трансформаторы. На МПЗ ОК – УЛ используется СТЭ 2×25 кВ и однофазные тяговые трансформаторы.

План мероприятий по увеличению пропускной и провозной способностей Восточного

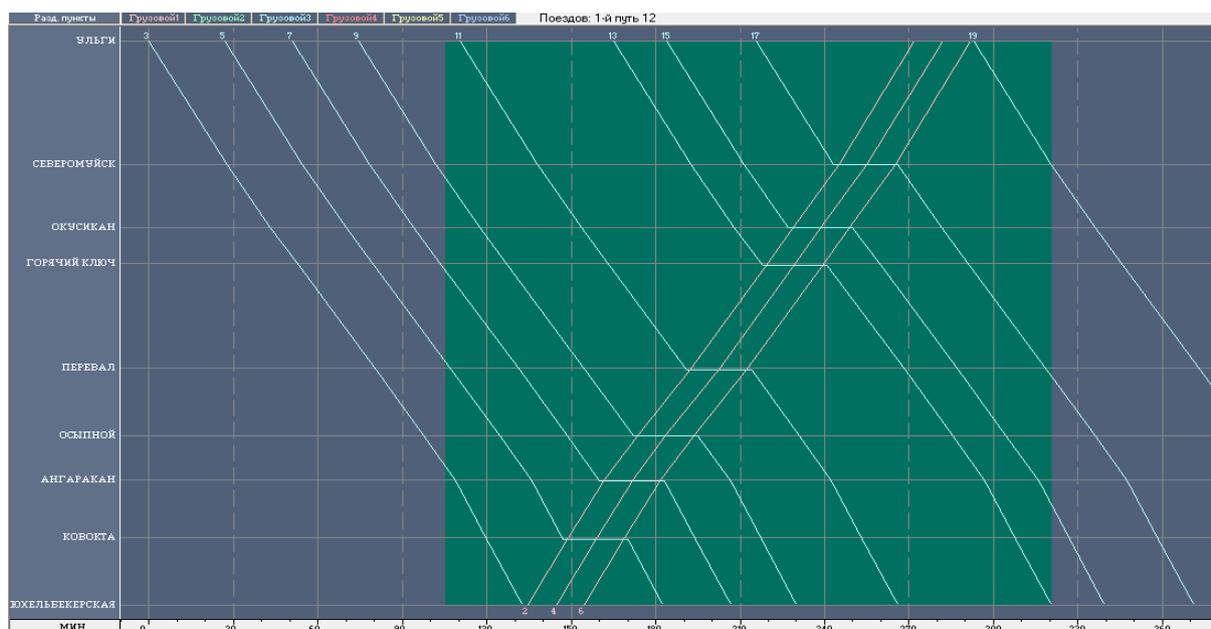


Рис. 1. Расчетный график движения
Fig. 1. Estimated traffic schedule

полигона на первом и втором этапах включает в себя реализацию мероприятий по усилению СТЭ БАМа, в том числе и на участке обхода СМ-тоннеля:

– установка устройств продольной компенсации (УПК) на ЭЧЭ ЯН мощностью 9,6 МВАр;

– строительство однострансформаторной ЭЧЭ УЛ;

– установка дополнительного тягового трансформатора и УПК мощностью 14,4 МВАр на ЭЧЭ ОК.

Учетом при оценке пропускной способности СТЭ исследуемого участка данные средства усиления.

Согласно методике определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования при определении минимальных интервалов в интенсивный час на однопутном участке используется частично-пакетный график – при безостановочном пропуске пакета из трех поездов повышенного веса (7 100 т) с интервалом 10 мин. в направлении наибольшего токопотребления (четное) и скрещении этого пакета со встречными поездами графической массы (5 708 т согласно письму № ИСХ-1389/ИЭРТ от 4 августа 2021 г.) на всех раздельных пунктах с путевым развитием.

Вид расчетного графика в интенсивный час на однопутном участке представлен на рис. 1.

Результаты расчета режима работы существующей СТЭ на участке ЯН – УЛ, полученные путем имитационного моделирования [5–10] в ПВК «Кортэс», представлены в табл. 1. Лимитирующей зоной является МПЗ АН – ПР. Ограничивающий параметр – минимальное напряжение на токоприемнике электровоза, равное 16,82 кВ (при допустимом значении не менее 21 кВ).

Разработка мер оптимизации работы устройств системы тягового электроснабжения на участке обхода СМ-тоннеля

Возможно использовать несколько мер оптимизации работы устройств электроснабжения [11–16], которые в дальнейшем будут способствовать и повышению надежности функционирования железных дорог в целом [17–20].

1. Применение усиливающего провода и увеличение сечения несущего троса.

Усиливающие провода (УП) вводят в состав контактной подвески, соединяя их параллельно в среднем через каждые 150 м с контактным проводом с целью уменьшения общего сопротивления контактной сети (КС). Это позволяет уменьшить потери электроэнергии в СТЭ, снизить падение напряжения в тяговой сети и, тем самым, поднять уровень напряжения в КС.

Такая мера способствует увеличению пропускной способности СТЭ соответствующего участка либо позволяет при отсутствии та-

Таблица 1. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ

Table 1. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	66 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее 3-х-минутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	16,77 16,82
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	90 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	72 (ЭЧЭ ПР)

кой необходимости увеличить расстояние между подстанциями на участке.

Существующая контактная подвеска на МПЗ АН – ПР – М-95 + МФ-100 + А-185, т.е. в настоящее время уже используется УП. Выполним расчет в ПВК «Кортэс», добавив в имеющуюся на данном участке контактную подвеску еще один УП марки А-185.

Основные характеристики рабочего режима СТЭ участка ЯН – УЛ при использовании дополнительного УП приведены в табл. 2.

Видим, что за счет увеличения сечения контактной подвески удастся поднять минимальное напряжение в КС МПЗ АН – ПР всего лишь с 16,82 кВ до 16,89 кВ. Единственный существенный положительный фактор – это снижение температуры нагрева проводов КС с 90 до 68 °С.

Рассмотрим результаты расчета с применением контактной подвески большего сечения и дополнительным УП – для подвески М-120 + МФ-100 + 2А-185 (табл. 3).

Таблица 2. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при использовании дополнительного усиливающего провода

Table 2. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section when using an additional reinforcing wire

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	65 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	16,83 16,89
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	68 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	71 (ЭЧЭ ПР)

Таблица 3. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при использовании дополнительного усиливающего провода и несущего троса большего сечения

Table 3. The main characteristics of the operating mode of the YaN – UL traction power supply system when using an additional reinforcing wire and a bearing cable with a larger cross section

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	65 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	16,87 16,93
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	67 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	71 (ЭЧЭ ПР)

Как видим, напряжение в КС увеличивается всего лишь с 16,82 до 16,93 кВ.

Приходим к выводу, что применение рассмотренных мер оптимизации нецелесообразно.

2. Оптимизация схемы питания.

На участке ЯН – УЛ в настоящее время отсутствуют посты секционирования (ПС). Наиболее эффективно строительство ПС в середине МПЗ, т.е. в месте наибольшей просадки напряжения при двусторонней схеме питания.

ПС КС выполняют следующие функции: соединение секций КС; снижение потерь электроэнергии; защита КС от коротких замыканий; отключение поврежденных секций и перераспределение электроэнергии между участками КС в зависимости от нагрузки.

В данном разделе анализируем эффективность применения ПС в середине лимитирующей МПЗ АН – ПР – на 1 356,5 км.

В табл. 4 представлены результаты расчета рабочего режима СТЭ при строительстве нового ПС.

Приходим к выводу, что строительство ПС без дополнительных мер оптимизации нецелесообразно, так как минимальное напряжение в КС на лимитирующей зоне не меняется.

3. Применение устройств компенсации реактивной мощности.

Для компенсации реактивной мощности в СТЭ используется два вида устройств – устройства продольной компенсации (УПК) и устройства поперечной компенсации (регулируемые – УКРМ, нерегулируемые – КУ).

Все виды установок – УПК, УКРМ и КУ – приводят к улучшению имеющихся параметров СТЭ. Так, УПК уменьшает реактивное сопротивление, а, следовательно, и полное сопротивление тяговой сети, вызывая, тем самым, уменьшение падения напряжения в ней, что существенно влияет на рост уровня напряжения на токоприемнике электровоза. УКРМ и КУ, будучи параллельно подключенными к тяговой нагрузке, приводят к уменьшению реактивного, а, следовательно, и полного тока в СТЭ, что приводит к более чем значительному (в квадратичной зависимости от тока) снижению потерь электроэнергии. При этом УКРМ еще и позволяют плавно управлять величиной реактивной мощности, помогая, в том числе, избежать перекомпенсации этой мощности при снижении объема грузоперевозок в отдельные моменты времени.

По первому и второму этапам развития БАМа на исследуемом участке уже используются УПК на следующих ЭЧЭ: на ЯН и ОК, соответственно, номинальной мощностью 9,6 и 14,4 МВАр.

Выполним моделирование СТЭ исследуемого обходного участка при монтаже дополнительных компенсирующих устройств: УКРМ на ПС в МПЗ АН – ПР и УПК на ЭЧЭ АН и ЭЧЭ ПР.

4. Монтаж дополнительных устройств поперечной компенсации.

Применение УКРМ позволяет разгрузить СТЭ от реактивной мощности, помогает работать

Таблица 4. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при строительстве нового поста секционирования

Table 4. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section during the construction of a new sectioning post

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	65 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	16,78 16,82
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	90 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	71 (ЭЧЭ ПР)

в более энергоэффективном режиме, высвобождает дополнительную мощность для нагрузки.

Наиболее эффективный способ применения устройства поперечной компенсации КУ – установка в середине МПЗ на ПС.

Выполним расчет параметров устройств поперечной компенсации.

Потребную мощность компенсирующих устройств $Q_{ку}$, кВАр, найдем по формуле (1):

$$Q_{ку} = 1,1 \cdot P_{ф} (\operatorname{tg}(\varphi_p) - \operatorname{tg}(\varphi_э)), \quad (1)$$

где $P_{ф}$ – фактически потребляемая активная мощность, равная 15 138 кВт, исходя из результатов выполненного ранее имитационного моделирования; $\operatorname{tg}(\varphi_p)$ – расчетный коэффициент реактивной мощности, 0,82; $\operatorname{tg}(\varphi_э)$ – экономический коэффициент реактивной мощности, задаваемый электроснабжающей организацией (принимаем 0,33); 1,1 – коэффициент запаса.

По формуле (1) имеем:

$$Q_{ку} = 1,1 \cdot 15\,138 \cdot (0,82 - 0,33) = 8\,159,4 \text{ кВАр.}$$

Значение установленной мощности $Q_{уст}$, кВАр, определим по формуле (2):

$$Q_{уст} = Q_{ку}/K_q, \quad (2)$$

где K_q – коэффициент полезного использования мощности установки компенсации для условий тяговой нагрузки, равный 0,5. По формуле (2) имеем:

$$Q_{уст} = 8\,159,4/0,5 = 16\,318,8 \text{ кВАр.}$$

В настоящее время на железных дорогах внедряются регулируемые компенсирующие устройства, способные гибко подстраивать необходимую мощность устройства в зависимости от потребляемой энергии. Поэтому при

имитационном моделировании будем учитывать компенсацию полученного значения реактивной мощности.

Результаты имитационного моделирования при использовании устройства поперечной компенсации на новом ПС в середине лимитирующей МПЗ АН – ПР представлены в табл. 5.

Видим, что монтаж УКРМ на предложенном к строительству ПС в МПЗ АН – ПР уже в большей мере воздействует на уровень напряжения на токоприемнике электровоза, поднимая его с 16,82 кВ до 17,64, что, тем не менее, существенно ниже допустимого значения – 21 кВ.

5. Применение устройств продольной компенсации.

УПК эффективно повышает напряжение в тяговой сети за счет снижения ее комплексного сопротивления. Возможные варианты монтажа УПК: в отсасывающую линию; в контактный и питающий провода (для СТЭ 2×25 кВ). Наиболее эффективным вариантом является монтаж УПК в отсос ЭЧЭ, так как в отсосе протекает весь тяговый ток подстанции.

В данном разделе выполним анализ эффективности применения УПК на подстанциях АН и ПР по отдельности и совместно.

Выполним расчет параметров УПК. Суммарное сопротивление до тяговых шин при наличии УПК X_{Σ} , рассчитаем по формуле (3):

$$X_{\Sigma} = X_c + X_t - X_{упк}, \quad (3)$$

где X_c – сопротивление сети внешнего электропитания, Ом; X_t – сопротивление тягового

Таблица 5. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электропитания участка ЯН – УЛ при установке регулируемого устройства поперечной компенсации на новом посту секционирования
Table 5. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YAN-UL section when installing an adjustable transverse compensation device at a new sectioning post

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,05 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	65 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum 3-minute average	17,59 17,64
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature, °С	86 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature, °С	70 (ЭЧЭ ПР)

трансформатора, Ом; $X_{упк}$ – сопротивление устройства продольной компенсации, Ом.

Величину сопротивления тягового трансформатора вычислим по формуле (4):

$$X_T = \frac{3U_k U_n^2}{100S_{тн}}, \quad (4)$$

где U_k – напряжение короткого замыкания тягового трансформатора, %; U_n – номинальное напряжение на шинах тягового распределительного устройства, В; $S_{тн}$ – номинальная мощность тягового трансформатора, ВА.

На тяговых подстанциях (ЭЧЭ) АН и ПР установлены трехфазные трансформаторы ТДТНЖ мощностью 40 МВА. По формуле (4) имеем:

$$X_T = \frac{3 \cdot 12 \cdot 27500^2}{100 \cdot 40\,000\,000} = 6,81 \text{ Ом.}$$

Сопротивление сети внешнего электропитания X_c найдем по формуле (5):

$$X_c = \frac{3U_n^2}{S_{к.з.}}, \quad (5)$$

где $S_{к.з.}$ – мощность короткого замыкания на вводах тяговой подстанции, ВА.

Для ЭЧЭ АН по формуле (5) имеем:

$$X_c = \frac{3 \cdot 27500^2}{603\,000\,000} = 3,76 \text{ Ом.}$$

Для ЭЧЭ ПР по формуле (5) имеем:

$$X_c = \frac{3 \cdot 27500^2}{610\,000\,000} = 3,72 \text{ Ом.}$$

Сопротивление УПК подбирается по формуле (6):

$$X_{упк} = \frac{X_{\Sigma c}}{3}. \quad (6)$$

По формуле (6) для ЭЧЭ АН имеем:

$$X_{упк} = \frac{6,81 + 3,76}{3} = 3,52 \text{ Ом.}$$

По формуле (6) для ЭЧЭ ПР имеем:

$$X_{упк} = \frac{6,81 + 3,72}{3} = 3,51 \text{ Ом.}$$

По результатам расчета для ЭЧЭ АН и ПР выбираем УПК с номинальной реактивной мощностью 9,6 МВАр на сопротивление 3,75 Ом.

В табл. 6 представлены результаты расчета при монтаже УПК мощностью 9,6 МВАр в отсесе ЭЧЭ АН, ПР по отдельности и совместно.

Результаты, приведенные в табл. 6, позволяют сделать следующие выводы:

- применение УПК на ЭЧЭ АН поднимает напряжение в КС до 18,62 кВ, но одновременно повышается температура нагрева отсасывающего провода на ЭЧЭ АН с 62 до 89 °С;
- монтаж УПК на ЭЧЭ ПР вызывает рост напряжения до 19,64 кВ, но существенно воз-

Таблица 6. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при установке устройства продольной компенсации

Table 6. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section when installing a longitudinal compensation device

Наименование параметра Parameter name	Значение Value		
	Монтаж устройства мощностью 9,6 МВАр в отсесе тяговой подстанции Installation of a 9,6 MVAr device in the suction of a traction substation		
	АН	ПР	АН и ПР
Коэффициент нагрузки силового трансформатора Power transformer load factor	1,16	1,40	1,27 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С Power transformer oil temperature	67	71	68 (ЭЧЭ ПР)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN - PR): minimum 3-minute average	18,54 18,62	19,52 19,64	21,05 21,12
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature	90	117	98 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature	89	132	117 (ЭЧЭ ПР)

Таблица 7. Основные характеристики рабочего режима системы тягового электроснабжения участка ЯН – УЛ при установке устройства продольной компенсации на ЭЧЭ АН и ПР и увеличении сечения отсоса на ЭЧЭ ПР

Table 7. Main characteristics of the operating mode of the traction power supply system of the YaN – UL section when installing a longitudinal compensation device on the ECHE AN and PR and increasing the suction cross-section on the ECHE PR

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Коэффициент нагрузки силового трансформатора	1,27 (ЭЧЭ ПР)
Температура масла силового трансформатора, °С	68 (ЭЧЭ ОК)
Напряжение в контактной сети, кВ (перегон АН – ПР): минимальное среднее трехминутное Voltage in the contact network, kV (section AN – PR): minimum среднее трехминутное 3-minute average	21,05 21,12
Температура нагрева контактной сети, °С Contact network heating temperature	98 (ЭЧЭ ПР)
Температура нагрева отсасывающей линии, °С Suction line heating temperature	90 (ЭЧЭ ПР)

растает температура отсасывающего провода на ЭЧЭ ПР – до 132 °С;

– включение УПК одновременно на ЭЧЭ АН и ЭЧЭ ПР решает проблему недостаточного уровня напряжения в КС, поскольку его величина достигает минимально допустимого значения – 21,12 кВ, но приводит к перегреву отсасывающей линии на ЭЧЭ ПР – до 117 °С.

Следовательно, целесообразно рассмотреть применение этого варианта усиления с увеличением сечения отсоса на ЭЧЭ ПР.

6. Увеличение сечения отсоса и монтаж устройства продольной компенсации на ЭЧЭ АН и ПР.

Выполним аналогичные расчеты, но с увеличенным сечением отсоса на ЭЧЭ ПР – с 3×А-185 до 3×А-240. Результаты представлены в табл. 7.

Таким образом, монтаж УПК на ЭЧЭ АН и ПР при одновременном увеличении сечения отсоса на ЭЧЭ ПР позволяет справиться с проблемами низкого напряжения (повышается с 16,82 кВ до 21,12) и перегрева отсасывающей

линии на ЭЧЭ ПР. Данную меру оптимизации возможно рекомендовать к применению.

Заключение

В ходе выполнения исследования разработаны меры оптимизации работы СТЭ участка обхода СМ-тоннеля.

Проведя анализ нескольких мер, способствующих обеспечению необходимой пропускной способности СТЭ исследуемого участка при перспективных размерах движения на 2030 г., рекомендовано к практическому применению следующее: монтаж УПК мощностью 9,6 МВАр на ЭЧЭ АН и ПР и увеличение сечения отсасывающего провода до 3×240 мм² на ЭЧЭ ПР.

Реализация разработанных мер оптимизации обеспечит надежное функционирование СТЭ исследуемого участка в случае капитального ремонта СМ-тоннеля и также при увеличении грузопотока по Восточному полигону, значительная часть которого будет переориентирована в направлении БАМа.

Список литературы

1. Крапивин М.И., Куцкий А.П., Пузина Е.Ю. Разработка технических решений по увеличению пропускной способности системы тягового электроснабжения участка Восточного полигона // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. Сургут, 2024. С. 180–186.
2. Бардушко А.Ю., Куцкий А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга на перспективу // Молодая наука Сибири. 2023. № 4 (22). С. 182–193. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1548/1038> (Дата обращения 18.08.2024).
3. Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Разработка предложений по устранению лимитирующих межподстанционных зон при развитии Восточного полигона // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2024. С. 61–65.

4. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
5. Галков А.А., Худоногов И.А. Применение технологии «виртуальной сцепки» при усилении системы тягового электроснабжения на участке Зима – Иркутск-Сортировочный // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Омск, 2023. С 215–220.
6. Girnik A.S., Fedyanin A.L. Simulation of Auxiliary Induction Motors with Asymmetric Power and Circuit Rotor in Using on the Locomotives // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Tomsk, 2012. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357674.
7. Учет влияния устройств фильтрации и компенсации на показатели качества электрической энергии СТЭ при пропуске поездов повышенной массы / Е.А. Морозов, В.В. Фареньк, М.В. Востриков и др. // Молодая наука Сибири. 2022. № 4 (18). С. 94–108. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/933> (Дата обращения 18.09.2024).
8. Овечкин И.С., Пузина Е.Ю. Снижение несимметрии напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 4 (60). С. 84–95.
9. Лобанов О.В. Система мониторинга работоспособности металлических опорных конструкций для скоростного и высокоскоростного движения электроподвижного состава // Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2021. С. 245–250.
10. Овечкин И.С. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в технологических ЛЭП напряжением 35 кВ // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2024. Т. 2. С. 255–261.
11. Зарубин А.Д., Астраханцев Л.А. Анализ систем тягового электроснабжения // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 214–220. URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/doklad_analiz_sistem_tyagovogo_elektrosnabzheniya.pdf (Дата обращения 18.09.2024).
12. Козлов Д.Г., Колпакова О.А., Хляка С.В. Повышение надежности электроснабжения // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2023. С. 100–104.
13. Оценка качества напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции с устройством продольной емкостной компенсации / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков, А.Р. Мамаев и др. // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2020. № 3 (88). С. 11–20.
14. Паскарь И.Н., Москалева К.А. Регулирование напряжения в энергосистеме с применением мультиагентного подхода // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 1 (159). С. 36–45.
15. Кубкина О.В., Лысенко В.Г. Энергообеспечение мониторинга параметров системы тягового электроснабжения // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11 (107). С. 714–724.
16. Коновалов И.Д., Некрасова В.Н., Волков М.А. К вопросу повышения качества электроснабжения потребителей // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2023. № 10. С. 200–205.
17. Влияние надежности электроснабжения и качества электрической энергии на эффективность функционирования электроэнергетической системы / М.А. Дубицкий, Е.В. Зубова, Р.Г. Любоников и др. // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2020. Т. 1. С. 102–108.
18. Пультяков А.В., Трофимов Ю.А., Скоробогатов М.Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 328–332.
19. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.
20. К повышению надежности устройств контактной сети / А.С. Есауленко, В.П. Ступицкий, В.А. Тихомиров и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 200–205. URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/statya_esaulenko_gotovo.pdf (Дата обращения 18.09.2024).

References

1. Krapivin M.I., Kutsyi A.P., Puzina E.Yu. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po uvelicheniyu propusknoi sposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Vostochnogo poligona [Development of technical solutions to increase the capacity of the traction power supply system of the Eastern polygon site]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsii Severa Rossii»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Problems of electric power industry and telecommunications of the North of Russia»]. Moscow, 2024. pp. 180–186.
2. Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P. Povyshenie propusknoi sposobnosti elektrifitsirovannogo uchastka zheleznoi dorogi Yakurim – Kirenga na perspektivu [Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim – Kirenga railway for the future]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 4 (22), pp. 182–193.
3. Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Razrabotka predlozhenii po ustraneniyu limitiruyushchikh mezhpodstantsionnykh zon pri razviti Vostochnogo poligona [Development of proposals for the elimination of limiting substation zones in the development of the Eastern polygon]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Issledovanie i razvitie rel'sovogo i avtomobil'nogo transporta»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Research and development of rail and road transport»]. Ekaterinburg, 2024, pp. 61–65.

4. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018, pp. 1–5.
5. Galkov A.A., Khudonogov I.A. Primenenie tekhnologii «virtual'noi sstepki» pri usilenii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na uchastke Zima – Irkutsk-Sortirovochnyi [Application of the «virtual coupling» technology when strengthening the traction power supply system on the Zima – Irkutsk-Sortirovochnyi section]. *Materialy X Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii v promyshlennosti i na transporte»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Improving the efficiency of operation of electromechanical energy converters in industry and transport»]. Omsk, 2023, pp. 215–220.
6. Girnuk A.S., Fedyanin A.L. Simulation of Auxiliary Induction Motors with Asymmetric Power and Circuit Rotor in Using on the Locomotives // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). Tomsk, 2012. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357674.
7. Morozov E.A., Farenik V.V., Vostrikov M.V., Tikhomirov V.A. Uchet vliyaniya ustroystv fil'tratsii i kompensatsii na pokazateli kachestva elektricheskoi energii STE pri propuske poezdov povyshennoi massy [Consideration of the influence of filtration and compensation devices on the quality of electric energy of the traction power supply system when passing trains of increased mass]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2022, no 4 (18), pp. 94–108.
8. Ovechkin I.S., Puzina E.Yu. Snizhenie nesimmetrii napryazheniya vozdukhnykh linii, pitayushchikh ustroystva avtoblokirovki [Reduction of voltage asymmetry of overhead lines feeding auto-locking devices]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2023, no 4 (60), pp. 84–95.
9. Lobanov O.V. Sistema monitoringa rabotosposobnosti metallicheskh opornykh konstruksii dlya skorostnogo i vysokoskorostnogo dvizheniya elektropodvizhnogo sostava [System for monitoring the operability of metal support structures for high-speed and high-speed movement of electric rolling stock]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnyi proizvodstvennye tekhnologii i resursoberegayushchaya energetika»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Innovative production technologies and resource-saving energy»]. Omsk, 2021, pp. 245–250.
10. Ovechkin I.S. Modelirovanie rezhimov dvoinykh zamykaniy na zemlyu v tekhnologicheskikh LEP napryazheniem 35 kV [Modeling of double earth fault modes in technological power lines with a voltage of 35 kV]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of energy production and use in Siberia»]. Irkutsk, 2024, pp. 255–261.
11. Zarubin A.D., Astrakhantsev L.A. Analiz sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Analysis of traction power supply systems]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 2 (12), pp. 214–220.
12. Kozlov D.G., Kolpakova O.A., Khlyaka S.V. Povyshenie nadezhnosti elektrosnabzheniya [Improving the reliability of power supply]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie na sovremennoy etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya v APK»* [Proceedings of the international scientific and practical conference «Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions in agriculture»]. Voronezh, 2023, pp. 100–104.
13. Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Mamaev A.R., Terletskii S.G. Otsenka kachestva napryazheniya na shinakh 27,5 kV tyagovoi podstantsii s ustroystvom prodol'noi emkostnoi kompensatsii [Evaluation of the quality of voltage on 27,5 kV tines of a traction substation with a longitudinal capacitive compensation device]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2020, no 3 (88), pp. 11–20.
14. Paskar' I.N., Moskaleva K.A. Regulirovanie napryazheniya v energosisteme s primeneniem mul'tiagentnogo podkhoda [Voltage regulation in the power system using a multi-agent approach]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2022, no 1 (159), pp. 36–45.
15. Kubkina O.V., Lysenko V.G. Energoobespechenie monitoringa parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Energy supply for monitoring parameters of traction power supply system]. *Inzheneryi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2023, no 11 (107), pp. 714–724.
16. Kononov I.D., Nekrasova V.N., Volkov M.A. K voprosu povysheniya kachestva elektrosnabzheniya potrebitelei [On the issue of improving the quality of power supply to consumers]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region], 2023, no 10, pp. 200–205.
17. Dubitskii M.A., Zubova E.V., Lyubovnikov R.G., Makarova A.V. Vliyaniye nadezhnosti elektrosnabzheniya i kachestva elektricheskoi energii na effektivnost' funktsionirovaniya elektroenergeticheskoi sistemy [Influence of reliability of power supply and quality of electric energy on the efficiency of functioning of the electric power system]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2020, Vol. 1, pp. 102–108.
18. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoychivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektrotiyagovoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2015, Vol. 1, pp. 328–332.
19. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruksii elementov infrastrukturnogo kompleksa zheleznykh dorog [Problems of formation, development and reconstruction of elements of the railway infrastructure complex]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2-kh t.)* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with interna-

tional participation «Education – Science – Production» (in 2 vol.]). Chita, 2022, Vol. 1, pp. 288–296.

20. Esaulenko A.S., Stupitskii V.P., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. K povysheniyu nadezhnosti ustroystv kontaktnoi seti [To increase the reliability of contact network devices]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 2 (12), pp. 200–205.

Информация об авторах

Пузина Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Information about the authors

Elena Yu. Puzina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.