

УДК 656.2/.4

*А. П. Куцкий, И. С. Овечкин, А. А. Галков*

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

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЯГОВОЙ СЕТИ ДВУХПУТНОГО ГОРНО-ПЕРЕВАЛЬНОГО УЧАСТКА**

**Аннотация.** *Повышение пропускной и провозной способностей существующих железнодорожных магистралей входит в Стратегию пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года [1]. Такая необходимость обусловлена повышением грузооборота между «Западом» и «Востоком», развитием нефтегазовых и горнодобывающих отраслей, а также необходимостью иметь резервные стратегические пути для осуществления железнодорожных перевозок.*

*В связи с тем, что система тягового электроснабжения Байкало-Амурской магистрали, является объектом которому свойственна многорежимность, неопределенность, наличие большого числа элементов, влияющих на показатели качества электрической энергии и пропускную способность, необходимо принимать решения о техническом оснащении каждого отдельного участка магистрали.*

*В данной работе будет проведен анализ применения некоторых возможных технических и организационных способов повышения пропускной способности одного из существующих участков Байкало-Амурской магистрали. Для проведения имитационного моделирования использован программный комплекс «Кортэс».*

**Ключевые слова:** *система тягового электроснабжения, БАМ, Кортэс, напряжение, электроподвижной состав, пропускная способность.*

*A. P. Kutsyi, I. S. Ovechkin, A. A. Galkov*

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL METHODS TO INCREASE THE CAPACITY OF THE TRACTION NETWORK OF A DOUBLE-TRACK MINING AND TRANSSHIPMENT SECTION**

**Annotation.** *Increasing the capacity and carrying capacity of existing railways is included in the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025 [1]. This necessity is due to the increase in cargo turnover between the "West" and the "East", the development of oil and gas and mining industries, as well as the need to have reserve strategic routes for rail transportation.*

*Due to the fact that the traction power supply system of the Baikal-Amur mainline is an object that is characterized by multi-mode, uncertainty, the presence of a large number of elements that affect the quality of electric energy and throughput, it is necessary to make decisions about the technical equipment of each individual section of the mainline.*

*This paper will analyze the application of some possible technical and organizational ways to increase the capacity of one of the existing sections of the Baikal-Amur Mainline. The software package "Kortes" was used to carry out simulation modeling.*

**Keywords:** *traction power supply system, BAM, Kortes, voltage, electric rolling stock, capacity.*

### **Введение**

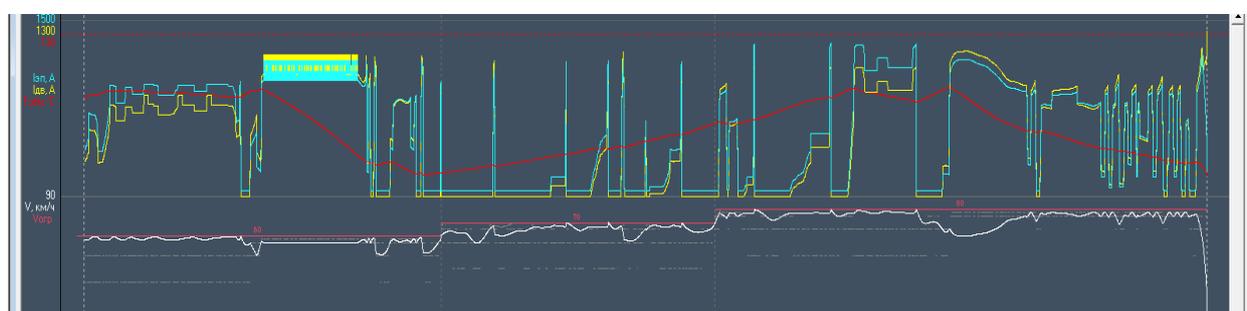
Для достижения планируемых показателей перевозочного процесса, в соответствии с Распоряжением правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. № 1100-р. «Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)»» [2] появляется вопрос о необходимости проведения анализа эффективности применения различных технических и

организационных методов [3-7] повышения пропускной способности для каждого участка рассматриваемой тяговой сети 2х25 кВ.

К таким мероприятиям можно отнести:

- применение равномерного графика движения поездов;
- включение в параллельную работу двух тяговых трансформаторов;
- секционирование контактной сети двухпутного участка;
- установка устройств параллельной компенсации реактивной мощности (КУ);
- установка устройств продольной компенсации реактивной мощности (УПК);
- размещение дополнительных автотрансформаторных пунктов.

В данной работе рассматривается один из существующих двухпутных участков Байкало-Амурской магистрали электрифицированный по системе 2х25 кВ. Участок состоит из 4-х тяговых подстанций с наличием двух крутых перевалов. График токов поездов показан на рисунке 1.



а)



б)

**Рис. 1. График тока поездов массой 7100 тонн;  
а – в нечетном направлении; б – в четном направлении**

### **Применение равномерного графика движения поездов**

Грузовые поезда стремятся распределить на графике равномерно в течение суток, так как при этом создаются условия для ритмичной работы станций и сокращается время нахождения локомотивов в пунктах оборота. Наряду с этим на электрифицированных линиях улучшается использование мощности локомотива и создается равномерная нагрузка на тяговые подстанции. С этой же целью чередуют на графике линии хода грузовых и пассажирских поездов, особенно в периоды сгущенного движения, предусматривают следование одного поезда на подъем в то время, когда другой идет под уклон, и т.д.

Проведем сравнение, по одному и тому же участку пустим поезда массой 7100 т по выбранному графику движения и по равномерному. В каждом направлении за сутки будет проходить по 36 поездов. Межпоездной интервал в при равномерном графике будет равен 40 минут.

При сравнении планируемого графика движения поездов и равномерного были получены результаты, приведенные в таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Сравнение случайного и равномерного графиков

Наименование подстанции	График движения	Расход энергии	
		Полной кВА·ч	Активной, кВт·ч
ТП-1	Случайный	469812	176440
ТП-1	Равномерный	465722	169646
ТП-2	Случайный	489209	215298
ТП-2	Равномерный	486027	213557
ТП-3	Случайный	488802	313800
ТП-3	Равномерный	484537	309596
ТП-4	Случайный	283848	170667
ТП-4	Равномерный	286064	173970

Таблица 2 – Сравнительная эффективность равномерного и случайного графика движения поездов по всему участку

График движения	Расход энергии		U <sub>min</sub> кВ	Потери в ТС	
	Активная, кВт·ч	Реактивная кВАр·ч		%	кВт·ч
Случайный	876204	1476290	16,83	9,4	82194
Равномерный	866770	1470142	20,49	9,3	80950

### Включение в параллельную работу двух тяговых трансформаторов

Для повышения предельной мощности тягового трансформатора и соответственно улучшения показателей качества электрической энергии, на сложных участках с движением тяжелых поездов можно применять включать в параллельную работу два тяговых трансформатора. Параллельная работа трансформаторов – подключение трансформаторов на совместную работу, при таком подключении соединяются между собой одноименные выводы обмоток со стороны высокого напряжения и выводы обмотки сторон низкого напряжения.

В существующей системе электроснабжения рассматриваемого участка, в некоторые МПЗ уже установлены в параллельную работу два тяговых трансформатора на каждом плече питания.

Для полноты проведения исследования необходимо определить значительность влияния установки одного или двух тяговых трансформаторов в параллельную работу.

Результаты такого сравнения по значениям напряжения приведены в таблице 3.

Следует отметить, что при наличии только одного тягового трансформатора, значения температуры обмоток и масла трансформатора на ТП-1 превышают максимально допустимое значения и составляют 150 и 113 градусов соответственно. Коэффициенты загрузки трансформаторов на подстанциях ТП-1 (правое плечо), ТП-2 (левое плечо), ТП-3 (правое плечо) и ТП-4 (левое плечо) превышают допустимые пределы и достигают 1,79 в первые 10 минут работы. В момент пуска коэффициент достигает значения 2,48, что так же является сверх допустимым.

Таблица 3 – Эффективность влияния двух трансформаторов в параллельной работе на напряжение

Межподстанционная зона	Путь	Один ТТ U <sub>min</sub> , кВ	Два ТТ U <sub>min</sub> , кВ
ТП-1 – ТП-2	1-й	15,40	18,75
	2-й	15,91	19,27
ТП-2 – ТП-3	1-й	23,93	23,9
	2-й	23,52	23,54
ТП-3 – ТП-4	1-й	14,02	16,83
	2-й	14,20	17,12

### Секционирование контактной сети двухпутного участка

На существующем участке имеется узловая схема секционирования контактной сети. Примерно в серединах всех 3-х МПЗ имеется пост секционирования с автотрансформаторным пунктом. Так как наличие пунктов параллельного соединения не предусмотрено в существующей схеме, то необходимо определить эффективность от их установки на рассматриваемом участке.

Результаты сравнения существующей (узловой) и параллельной схемы секционирования контактной сети приведены в таблицах 4, 5

Таблица 4 – Сравнение эффективности параллельной и узловой схем секционирования контактной сети по напряжению

Межподстанционная зона	Путь	Узловая схема U <sub>э</sub> , В миним.	Параллельная схема U <sub>э</sub> , В миним.
ТП-1 – ТП-2	1-й	18,75	19,00
	2-й	19,27	19,31
ТП-2 – ТП-3	1-й	23,90	23,89
	2-й	23,54	23,54
ТП-3 – ТП-4	1-й	16,83	17,73
	2-й	17,12	17,55

Таблица 5 – Сравнение эффективности параллельной и узловой схем секционирования контактной сети по потерям энергии

Схема	Расход энергии		Потери в тяговой сети кВт·ч (%)	Потери в трансформаторах, кВт·ч			Суммарные потери, кВт·ч
	W <sub>а</sub> , кВт·ч	W <sub>р</sub> , кВАр·ч		нагр	х.х.	х.х АТ	
Узловая	876204	1476290	82194	5646, 1	7008	5616	100464
			9,4				
Параллельная	873730	1459192	72067	5556, 7	7008	5613	90244
			8,2				

### Установка устройств параллельной компенсации реактивной мощности (КУ)

При наличии компенсации реактивной мощности электрооборудование разгружается от реактивных токов и работает в более экономичном режиме, появляется возможность дополнительной загрузки активной мощности. Эффект в первом случае – снижение активных потерь, во втором случае – отказ от установки дополнительного оборудования.

На участках ТП-1 – ТП-2 и ТП-3 – ТП-4 наблюдается значительная величина реактивной мощности, необходимо провести исследование и подобрать оптимальные мощности устройств и места их установки.

Установим КУ (5000 кВар) на шины КС ТП-1 (п.п.), ТП-2 (л.п.), Ния (п.п.), ТП-4 (л.п.) и на ПСА в МПЗ ТП-1 – ТП-2. Результаты показаны в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты исследования представлены в таблице.

Межподстанционная зона	Путь	Без КУ Uэ, В миним.	Ky Uэ, В миним.
ТП-1 – ТП-2	1-й	18,75	19,48
	2-й	19,27	20,01
ТП-2 – ТП-3	1-й	23,90	23,95
	2-й	23,54	23,52
ТП-3 – ТП-4	1-й	16,83	17,34
	2-й	17,12	17,61
Расход реактивной энергии, кВАр	Весь участок	1476290	1006180
Потери в тяговой сети, кВт·ч (%)	Весь участок	82194 (9,4)	79146 (8,9%)

### Установка устройств продольной компенсации реактивной мощности (УПК)

УПК представляет собой конденсаторную установку, которая включается последовательно с выводами тягового трансформатора подстанции и с проводами контактной сети 27,5 кВ для повышения напряжения в тяговой сети 2\*27,5 кВ за счет снижения ее комплексного сопротивления. Основная задача УПК - компенсировать индуктивное сопротивление тягового трансформатора сети внешнего электроснабжения и проводов контактной сети.

Проведем моделирование применения УПК (3200 кВАр) для рассматриваемого участка по следующим вариантам:

Вариант 1 – без УПК;

Вариант 2 – УПК на ПСА в МПЗ ТП-1 – ТП-2; УПК на ПСА в МПЗ ТП-3 – ТП-4

Вариант 3 – УПК на шинах КС ТП-1 (п.п.), ТП-2 (л.п.), ТП-3 (п.п.), ТП-4 (л.п.).

Результаты моделирования приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты применения УПК

Межподстанционная зона	Путь	Вариант 1 Uэ, В миним.	Вариант 2 Uэ, В миним.	Вариант 3 Uэ, В миним.
ТП-1 – ТП-2	1-й	18,75	19,35	19,88
	2-й	19,27	19,43	20,37
ТП-2 – ТП-3	1-й	23,90	23,89	23,89
	2-й	23,54	23,63	23,54
ТП-3 – ТП-4	1-й	16,83	16,73	18,00
	2-й	17,12	17,22	18,27
Расход реактивной энергии, кВАр	Весь участок	1476290	1467490	1504329
Расход активной энергии, кВт	Весь участок	876204	879759	889561
Потери в тяговой сети, кВт·ч (%)	Весь участок	82194 (9,4)	84913 (9,7)	82234 (9,2)
Перегрузка АТП	Весь участок	-	2,13 ПСА в МПЗ ТП-1 – ТП-2	-

### Размещение дополнительных автотрансформаторных пунктов

Одной из отличительных особенностей системы 2х25кВ от системы 25 кВ является наличие автотрансформаторных пунктов. Автотрансформаторный пункт – электротехническая установка в системе тягового электроснабжения 2Х25 кВ, предназначенная для преобразования электроэнергии напряжением 50—55 кВ, поступающей от тяговой подстанции в тяговую сеть, в электроэнергию контактной сети напряжением 25—29 кВ, необходимую для питания ЭПС.

Проверим эффективность от АТП узловой схемы рассматриваемого участка при добавлении новых АТП на в МПЗ ТП-1 – ТП-2 (2 шт.) и на МПУ ТП-3 – ТП-4 (2 шт.). Результаты приведены в таблице 8

Таблица 8 – Влияние от установки дополнительных АТП

Межподстанционная зона	Путь	Без дополнительных АТП Uэ, В миним.	Дополнительные АТП Uэ, В миним.
ТП-1 – ТП-2	1-й	18,75	19,13
	2-й	19,27	19,53
ТП-2 – ТП-3	1-й	23,90	23,89
	2-й	23,54	23,54
ТП-3 – ТП-4	1-й	16,83	17,10
	2-й	17,12	17,52
Потери х.х. АТ, кВт·ч	Весь участок	5616	7344
Потери в тяговой сети, кВт·ч (%)	Весь участок	82194 (9,4)	77541(8,9%)

### Заключение

1. По результатам расчётов видно, что при равномерном графике движения поездов напряжение значительно увеличивается, а потери в тяговой сети уменьшаются. Создание равномерного графика на практике, очень сложный процесс, но нужно пытаться максимально равномерно соблюдать межпоездной интервал.

2. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что параллельная работа двух тяговых трансформаторов является наиболее эффективным способом повышения пропускной способности на сложных и грузонапряженных участках [8]. Применение такого метода позволило повысить минимальное значение напряжения на 3 кВ.

3. Применение параллельной схемы секционирования позволило повысить напряжение на токоприемниках, особенно заметно на участке ТП-3 – ТП-4. Повышение напряжения оказалось не единственным обоснованием применением параллельной схемы на рассматриваемом участке. Существенно снизились потери в тяговой сети, в среднем на 10000 кВт·ч за сутки [9].

4. Применение КУ значительно повысило уровень напряжения, а также уменьшила потери в тяговой сети за счет снижения тяговых реактивных токов, которые создает локомотив. При установке КУ мощностью 5000 кВАр, в сети остается еще значительная часть реактивной мощности. КУ целесообразно применять при больших мощностях тягового состава, так как происходит компенсация именно тягового реактивно-индуктивного тока [10].

5. Применение УПК позволило повысить минимальный уровень напряжения на 1кВ, а также частично компенсировало значение реактивной мощности.

6. Наличие дополнительных автотрансформаторных пунктов имеет определенное влияние на уровень напряжения, значительный эффект оказывается на снижение потерь в тяговой сети.

7. Использование устройств компенсации реактивной мощности может негативно сказаться как на повышенной нагрузке трансформаторов, так и на изменении уровня напряжения. Необходимо точно рассчитывать мощности устройств компенсации в соответствии с существующими графиками движения поездов. Рекомендуется применять плавнорегулируемые (или ступенчатые) устройства компенсации [11].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-р «Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года»
2. Распоряжение правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. № 1100-р. «Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)»»
3. Куцый А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим – Киренга для обеспечения тяги сдвоенных электроподвижных составов массой 14200 тонн // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». 2022. № 2(16), доступно на: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/778>.
4. Куцый А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим – Киренга для обеспечения графика движения поездов с максимальной массой 7100 тонн. // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». 2022. № 2(16), доступно на: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/777>.
5. Пузина Е.Ю., Перельгин В.М. Усиление системы тягового электроснабжения участка Якурим-Звездная ВСЖД. Транспорт-2013: труды международной научно- практической конференции. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2013.-С. 176-178.
6. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро-Таксимо ВСЖД /Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно- практической конференции. - Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2016. - С. 306-310.
7. Воронина Е.В., Куцый А.П. Модернизация пути и повышение пропускной способности однопутного электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга // Молодая наука Сибири. 2021. № 3 (13). С. 196-204.
8. Воронина Е.В., Куцый А.П. Повышение качества электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 118-125.
9. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Ния-Киренга ВСЖД/ Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте. материалы Шестого Международного симпозиума "Элтранс-2011". 2013. С. 464-468.
10. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Управление качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015, 180 с. ий интеллектуальных сетей (SMART GRID). Иркутск: ИрГУПС, pp: 412.
11. Крюков А.В., Куцый А.П., Черепанов А.В. Применение управляемых источников реактивной мощности в системах электроснабжения железных дорог//Транспортная инфраструктура Сибирского региона. В 2-х тт. Т. 1. Иркутск: ИрГУПС, 2016. С. 588-593.

### REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation No. 207-r dated February 13, 2019 "Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025"
2. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1100-r dated April 28, 2021. "Passport of the investment project "Modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railway with the development of access and carrying capacity (second stage)""
3. Kutsyy A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Increasing the throughput capacity of the Yakurim – Kirenga section to provide traction for twin electric rolling stock weighing 14200 tons // Electronic

scientific journal "Young Science of Siberia". 2022. No. 2(16), available at: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/778> .

4. Kutsyy A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Increasing the capacity of the Yakurim – Kirenga section to ensure the schedule of trains with a maximum weight of 7,100 tons. // Electronic scientific journal "Young Science of Siberia". 2022. No. 2(16), available at: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/777>

5. Puzina E.Yu., Perelygin V.M. Strengthening of the traction power supply system of the Yakurim-Zvezdnaya VSZHD section. Transport-2013: Proceedings of the International Scientific and practical conference. Rostov-on-Don: Publishing House of RSUPS, 2013.-pp. 176-178.

6. Strengthening of the traction power supply system of the Churo-Taksimov section of the VSZHD /Transport: science, education, production: proceedings of the International Scientific and Practical Conference. - Rostov-on-Don: Publishing House of RSUPS, 2016. - pp. 306-310.

7. Voronina E.V., Kutsy A.P. Modernization of the track and increasing the capacity of the single-track electrified section of the Yakurim– Kirenga railway // Molodaya nauka Sibiri. 2021. No. 3 (13). pp. 196-204.

8. Voronina E.V., Kutsy A.P. Improving the quality of electric energy in the power supply systems of railways // Molodaya nauka Sibir. 2021. No. 2 (12). pp. 118-125.

9. Puzina E.Yu. Strengthening of the traction power supply system of the Nia-Kirenga section of the VSZHD/ Electrification and development of the infrastructure for power supply of train traction on railway transport. Proceedings of the Sixth International Symposium "Eltrans-2011". 2013. pp. 464-468.

10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Quality management of electric energy in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2015, 180 p. of intelligent networks (SMART GRID). Irkutsk: IrGUPS, pp: 412.

11. Kryukov A.V., Kutsy A.P., Cherepanov A.V. Application of controlled reactive power sources in railway power supply systems//Transport infrastructure of the Siberian region. In 2 tt. Vol. 1. Irkutsk: IrGUPS, 2016. pp. 588-593.

#### **Информация об авторах**

*Куцкий Антон Павлович* – начальник МНЦ УНИР, старший преподаватель каф. ЭТ, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: [kutsyi\\_ap@irgups.ru](mailto:kutsyi_ap@irgups.ru)

*Овечкин Илья Сергеевич* – студент гр. СОД.1-18-2, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск

*Галков Александр Андреевич* – студент гр. СОД.1-18-2, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск

#### **Information about the authors**

*Kutsyi Anton Pavlovich* – Head of the UNIR Research Center, senior lecturer of the Faculty. ET, Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: [kutsyi\\_ap@irgups.ru](mailto:kutsyi_ap@irgups.ru)

*Ovechkin Ilya Sergeevich* – student gr. SOD.1-18-2, Irkutsk State Transport University, Irkutsk

*Galkov Alexander Andreevich* – student gr. SOD.1-18-2, Irkutsk State Transport University, Irkutsk