

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

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

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКА ЯКУРИМ – КИРЕНГА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЯГИ СДВОЕННЫХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫХ СОСТАВОВ МАССОЙ 14200 ТОНН

**Аннотация.** Модернизация Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей входит в долгосрочную программу развития железных дорог до 2025 года. Необходимость модернизации БАМа обуславливается максимальной загруженностью Транссибирской магистрали и значительными запасами природных ресурсов находящихся в северных регионах.

В статье рассмотрены вопросы эффективности применения технических способов усиления системы тягового электроснабжения 2х25кВ двухпутного участка Якурим – Киренга. По результатам проведенного моделирования в программном комплексе Кортэс, предложен оптимальный комплексный вариант усиления системы тягового электроснабжения для обеспечения пропускной способности участка для перспективного графика движения состоящего из электроподвижных составов массой 7100 тонн и сдвоенных электроподвижных составов массой 14200 тонн.

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, БАМ, Кортэс, напряжение, электроподвижной состав, сдвоенные поезда.

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

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

## INCREASING THE CAPACITY OF THE YAKURIM – KIRENGA SECTION TO PROVIDE TRACTION FOR TWIN ELECTRIC ROLLING STOCK WEIGHING 14200 TONS

**Annotation.** The modernization of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railways is part of the long-term program for the development of railways until 2025. The need to modernize the BAM is caused by the maximum workload of the Trans-Siberian railway and significant reserves of natural resources located in the northern regions.

The article considers the issues of the effectiveness of the application of technical methods for strengthening the 2X25 kV traction power supply system of the Yakurim – Kirenga double-track section. Based on the results of the simulation carried out in the Kortés software package, the optimal complex option of strengthening the traction power supply system to ensure the capacity of the site for a promising traffic schedule consisting of electric rolling stock weighing 7,100 tons and twin electric rolling stock weighing 14,200 tons is proposed.

**Keywords:** traction power supply system, BAM, Cortés, voltage, electric rolling stock, twin trains.

### Введение

В соответствии с паспортом инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)» [1], утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. № 1100-р, будут реализованы мероприятия по развитию железнодорожной инфраструктуры с достижением в IV квартале 2024 года на участке Лена-Восточная – Таксимо провозной способности в 51,2 млн. тонн в год в грузовом направлении с предельной массой грузового состава в 7100 тонн.

При формировании проектной документации и технических расчетов необходимо предусмотреть возможность дальнейшего повышения пропускной способности Байкало-Амурской магистрали [2-7]. Это связано с ежегодным увеличением товарооборота между Российской Федерацией и странами Азии.

В качестве перспективного графика движения тяжеловесных поездов, рассмотрим график состоящий из пакета поездов массой 7100 тонн и сдвоенных массой 14200 тонн.

## Описание профиля пути и системы тягового электроснабжения участка Якурим – Киренга

Участок Якурим – Киренга является сложным горно-перевальным участком железной дороги, электрифицированным по системе 2х25 кВ. Профиль пути участка представлен на рисунке 1 и в таблице 1.

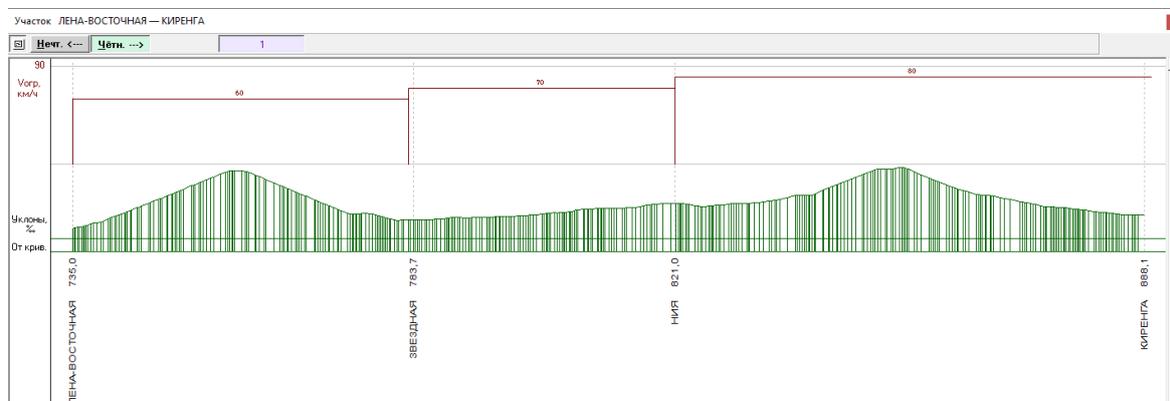


Рис. 1. Профиль пути участка Лена-Восточная – Киренга

Таблица 1 – Профиль пути Якурим – Киренга

| Раздельные пункты | Начальный километр элемента | Длина элемента, км | Уклон, % | От кривой, % |
|-------------------|-----------------------------|--------------------|----------|--------------|
| 1                 | 2                           | 3                  | 4        | 5            |
| Лена Восточная    | 733                         | 2                  | 1.8      | -            |
|                   | 735                         | 1                  | 7.2      | 1            |
|                   | 736                         | 3                  | 11.2     | 0.7          |
|                   | 739                         | 18                 | 16.9     | 0.7          |
|                   | 757                         | 1                  | 4.0      | 0.5          |
|                   | 758                         | 1                  | -1.5     | 0.1          |
|                   | 759,9                       |                    |          |              |
|                   | 760                         | 14                 | -17.5    | 0.2          |
|                   | 774                         | 1                  | -6.3     | 0.7          |
|                   | 775                         | 2                  | 1.8      | 0.1          |
|                   | 777                         | 1                  | -6.4     | 0.7          |
|                   | 778                         | 2                  | -13.8    | 0.2          |
|                   | 780                         | 1                  | -7.8     | 0.2          |
| Звездная          | 781                         | 2                  | 1.9      | 0.7          |
|                   | 783                         | 2                  | -1.1     | 0.2          |
|                   | 784.1                       |                    |          |              |
|                   | 785                         | 3                  | 2.3      | 0.5          |
|                   | 788                         | 1                  | 7.5      | 0.4          |
|                   | 789                         | 1                  | 0.2      | 0.2          |
|                   | 790                         | 1                  | -3.6     | 0.1          |
|                   | 791                         | 4                  | 1.2      | 0.7          |
|                   | 795                         | 1                  | 3.8      | 0.4          |
|                   | 796                         | 1                  | -0.8     | 0.7          |
|                   | 797                         | 5                  | 2.8      | 0.5          |
|                   | 802                         | 2                  | 3.8      | 0.5          |
|                   | 804                         | 1                  | 0.6      | 0.2          |
| 804.5             |                             |                    |          |              |
| 805               | 3                           | 6.1                | 0.1      |              |
| 808               | 1                           | -0.3               | 0.3      |              |
| 809               | 2                           | 2.6                | 0.2      |              |
| 811               | 2                           | -1.2               | 0.1      |              |
| 813               | 3                           | 3.7                | 0.1      |              |
| 816               | 2                           | 7.8                | 0.1      |              |
| Ния               | 818                         | 4                  | 2.4      | 0.2          |
|                   | 821,4                       |                    |          |              |

Продолжение таблицы 1

| 1       | 2     | 3     | 4     | 5   |
|---------|-------|-------|-------|-----|
|         | 822   | 3     | -4.2  | 0.1 |
|         | 825   | 5     | 4.0   | 0.2 |
|         | 830   | 1     | -0.1  | 0.1 |
|         | 830.5 |       |       |     |
|         | 835   | 4     | 8.1   | 0.2 |
|         | 839   | 2     | 1.7   | -   |
|         | 841   | 9     | 16.3  | 0.3 |
|         | 850   | 1     | 5.8   | 0.2 |
|         | 851   | 3     | 3.9   | 0.3 |
|         | 851.9 |       |       |     |
|         | 854   | 1     | -12.2 | 0.8 |
|         | 855   | 7     | -17.0 | 0.3 |
|         | 862   | 3     | -11.4 | 0.2 |
|         | 865   | 2     | -3.6  | 0.4 |
|         | 867   | 8     | -8.2  | 0.1 |
|         | 867.3 |       |       |     |
|         | 875   | 3     | -3.3  | 0.2 |
|         | 877   |       |       |     |
|         | 878   | 8     | -5    | 0.5 |
|         | 886   | 1     | -0.4  | -   |
|         | 887   | 1     | 1.6   | -   |
| Киренга | 888   | 1.000 | -1.2  | -   |
|         | 888,6 |       |       |     |

На рисунке 2 показана схема существующей системы тягового электроснабжения 2х25кВ обеспечивающая питание участка Якурим – Киренга.



Рис. 2. Схема питания и секционирования тяговой сети участка Якурим - Киренга

На рисунке 3 изображены параметры тяговых подстанций участка Якурим – Киренга.

| Наименование подстанции | Плечо  | Фаза плеча | Скв, МВ·А | Тип трансформатора    | Колево вкл. | Ухв, В | КУ на шинах КС | УПК в КС | УПК в ПП | УПК в фазе | Sp, МВ·А | Sn, МВ·А | Принадлежность к энергосистеме |
|-------------------------|--------|------------|-----------|-----------------------|-------------|--------|----------------|----------|----------|------------|----------|----------|--------------------------------|
| ЯКУРИМ                  | левое  | отст.      | 2803      | ОРДН.К-25000/220-79У1 | 1           | 27500  | -              | -        | -        | -          | -        | -        | -                              |
|                         | правое | опер.      |           | ОРДН.К-25000/220-79У1 | 2           | 27500  | -              | -        | -        | -          | -        | -        | -                              |
| ЗВЕЗДНАЯ                | левое  | отст.      | 1689      | ОРДН.К-25000/220-79У1 | 2           | 27500  | -              | -        | -        | -          | -        | -        | -                              |
|                         | правое | опер.      |           | ОРДН.К-25000/220-79У1 | 1           | 27500  | -              | -        | -        | -          | -        | -        | -                              |
| НИЯ                     | левое  | отст.      | 1374      | ОРДН.К-25000/220-79У1 | 1           | 27500  | -              | -        | -        | -          | -        | -        | -                              |
|                         | правое | опер.      |           | ОРДН.К-25000/220-79У1 | 2           | 27500  | -              | -        | -        | -          | -        | -        | -                              |
| КИРЕНГА                 | левое  | отст.      | 512       | ОРДН.К-25000/110-81У1 | 2           | 27500  | -              | -        | -        | -          | -        | -        | -                              |
|                         | правое | опер.      |           | ОРДН.К-25000/110-81У1 | 1           | 27500  | -              | -        | -        | -          | -        | -        | -                              |

Рис. 3. Параметры тяговых подстанций

## Расчет тяги электроподвижного состава и формирование графика движения

В следствии больших перспектив развития Байкало-Амурской магистрали и регулярного повышения плановых показателей по провозной способности, возникает необходимость предусмотреть возможность пропуска сдвоенного тягового подвижного состава массой 14200 тонн (7100 тонн + 7100 тонн).

Результаты тягового расчета в четном и нечетном направлениях для сдвоенного подвижного состава общей массой 14200 тонн представлены на рисунках 4-6 и в таблицах 2,3. Для тяги подвижного состава в четном и нечетном направлениях потребовалось 5 тяговых локомотивов на один подвижной состав.



Рис. 4. Результаты тягового расчета состава массой 14200 тонн в нечетном направлении

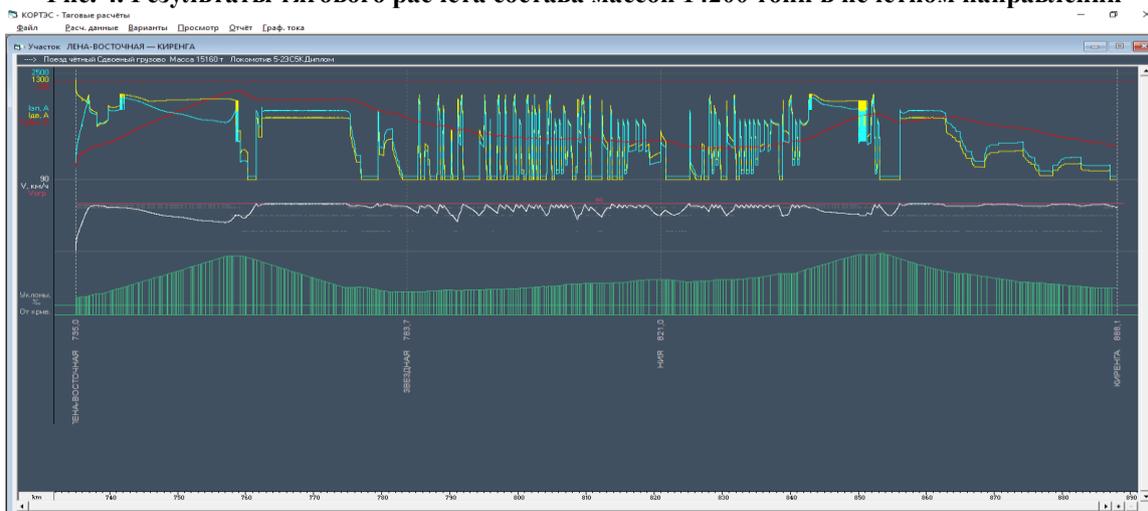


Рис. 5. Результаты тягового расчета состава массой 14200 тонн в четном направлении

Таблица 2 – Результаты тягового расчета грузового состава массой 14200 тонн в нечетном направлении

| Участок: Лена-Восточная — Киренга / БАМ   |           |                 |          |                |         |
|---|-----------|-----------------|----------|----------------|---------|
| Поезд: Сдвоенный грузовой, масса 15160 т, длина 2936 м, локомотив 5-2ЭС5КДиплом |           |                 |          |                |         |
| Расход энергии: 33624.6 кВт·ч; рекуперация 13866.4 кВт·ч; (41.2%)               |           |                 |          |                |         |
| Удельный расход: активн. 14.5 Вт·ч/т·км; полн. 26.9 В·А·ч/т·км                  |           |                 |          |                |         |
| Техническая скорость: 53.5 км/ч   |           |                 |          |                |         |
| Макс. ток поезда 1927 А на км 858.70  |           |                 |          |                |         |
| Макс. перегрев обмоток двиг. 96° (доп. 120°) на км 758.15                       |           |                 |          |                |         |
| Перегон   | Длина, км | Время хода, мин |          | Расход энергии |         |
|   |           | полн.           | п. током |                |         |
| Киренга - Ния   | 67.1      | 73.4            | 59.3     | 17002.4        | 28089.5 |
| Ния - Звездная  | 37.3      | 40.5            | 17.2     | 1658.8         | 4075.1  |
| Звездная - Лена-Восточн   | 48.7      | 57.9            | 50.8     | 14963.5        | 30351.9 |
| Киренга - Лена-Восточна   | 153.1     | 171.7           | 127.3    | 33624.6        | 62516.4 |

**Таблица 3 - Результаты тягового расчета грузового состава массой 14200 тонн в четном направлении**

| Участок: Лена-Восточная — Киренга / БАМ   |           |                 |         |                |         |
|---|-----------|-----------------|---------|----------------|---------|
| Поезд: Сдвоенный грузовой, масса 15160 т, длина 2936 м, локомотив 5-2ЭС5КДиплом |           |                 |         |                |         |
| Расход энергии: 39397.7 кВт·ч; рекуперация 12858.5 кВт·ч; (32.6%)               |           |                 |         |                |         |
| Удельный расход: активн. 17.0 Вт·ч/т·км; полн. 29.1 В·А·ч/т·км                  |           |                 |         |                |         |
| Техническая скорость: 52.4 км/ч   |           |                 |         |                |         |
| Макс. ток поезда 1927 А на км 842.79  |           |                 |         |                |         |
| Макс. перегрев обмоток двиг. 109° (доп. 120°) на км 758.51                      |           |                 |         |                |         |
| Перегон   | Длина, км | Время хода, мин |         | Расход энергии |         |
|   |           | полн.           | п.ТОКОМ |                |         |
| Лена-Восточная - Звездная   | 48.7      | 59.3            | 54.5    | 18440.7        | 32260.7 |
| Звездная - Ния  | 37.3      | 42.3            | 22.7    | 8072.4         | 9350.8  |
| Ния - Киренга   | 67.1      | 73.6            | 61.1    | 12884.4        | 25915.7 |
| Лена-Восточная - Киренг   | 153.1     | 175.1           | 138.3   | 39397.7        | 67527.3 |

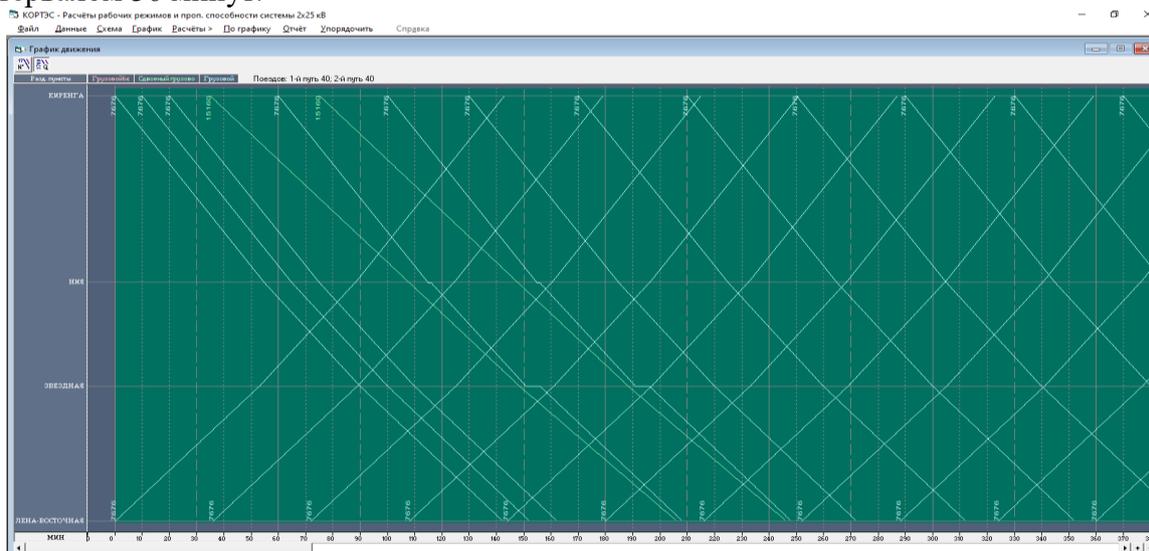
Общие результаты тягового расчета для всех рассматриваемых масс поездов в четном и нечетном направлениях приведены на рисунке 6.

| NPN     | Участок движения         | Длина, км | Категория поезда   | Локомотив     | Масса поезда | Время хода, мин (полное, п.током) | Расход энергии кВт·ч | Рекуперация кВт·ч (%) |
|---------|--------------------------|-----------|--------------------|---------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| ✓ Нечт. | КИРЕНГА – ЛЕНА-ВОСТОЧНАЯ | 153.1     | Грузовой           | 2-2ЭС5КДиплом | 6384         | 158.8 117.5                       | 14324.9 25758.8      | 5689.6 39.7%          |
| ✓ Четн. | ЛЕНА-ВОСТОЧНАЯ – КИРЕНГА | 153.1     | Грузовой           | 3-2ЭС5КДиплом | 6576         | 141.7 109.4                       | 17817.8 30837.6      | 6093.7 34.2%          |
| ✓ Нечт. | КИРЕНГА – ЛЕНА-ВОСТОЧНАЯ | 153.1     | Сдвоенный грузовой | 5-2ЭС5КДиплом | 15160        | 171.7 127.3                       | 33624.6 62516.4      | 13866.4 41.2%         |
| ✓ Четн. | ЛЕНА-ВОСТОЧНАЯ – КИРЕНГА | 153.1     | Сдвоенный грузовой | 5-2ЭС5КДиплом | 15160        | 175.1 138.3                       | 39397.7 67527.3      | 12858.5 32.6%         |
| ✓ Нечт. | КИРЕНГА – ЛЕНА-ВОСТОЧНАЯ | 153.1     | Грузовой           | 3-2ЭС5КДиплом | 7676         | 142.9 97.9                        | 17676.4 32894.0      | 7645.3 43.3%          |
| ✓ Четн. | ЛЕНА-ВОСТОЧНАЯ – КИРЕНГА | 153.1     | Грузовой           | 3-2ЭС5КДиплом | 7676         | 143.3 114.5                       | 20829.9 35898.4      | 7245.5 34.8%          |

**Рис. 6. Общие данные по тяговым расчетам**

В нечетном направлении (Киренга – Лена Восточная) заложен график движения 7100 – 10 мин. – 7100 – 10 мин. – 7100 – 15 мин. – 14200 – 25 мин. – 7100 – 15 мин. – 14200 – 25 мин. – 7100 остальные 33 поезда массой 7100 тонн движутся по равномерному графику движения с интервалом 40 минут. Фрагмент графика движения представлен на рисунке 7.

В четном направлении принят равномерный график движения поездов массой 7100 тонн с интервалом 36 минут.



**Рис.7. Фрагмент перспективного графика движения**

### Расчет пропускной способности без усиления

Результаты моделирования представлены в таблицах 4 – 9.

**Таблица 4 - Основные характеристики рабочего режима участка**

|                                |          |  |
|--------------------------------|----------|--|
| Время расчета, мин: начало     | 0;       | продолж. 1440; шаг 1,0   |
| Температура воздуха, °С        | 20       |  |
| Использованы графики движ.     | путей    | 1-го, 2-го   |
| Расход энергии: активн., кВт·ч | 966092;  | потери в тяг. сети 96456 ( 10,0% )                             |
| реактивн., квар·ч              | 1665661; | потери х.х. АТ 5616 кВт·ч                                      |
| Огр. коэфф. нагрузки ЭЧЭ       | 1,34     | (доп. 1,5 10 мин) Якурим (прав. пл.)                           |
| темпер. трансформ., °С         | 79       | (доп. 95° масл.) Якурим (прав. пл.)                            |
| Огр. коэфф. нагрузки АТП       | 2,30*    | (доп. 2,0 1 мин) 775-й км (1-й путь)                           |
| темпер. автотрансформ., °С     | 77       | (доп. 95° масл.) 775-й км (1-й путь)                           |
| Напряжения, кВ: мин.           | 13,97*   | 1-й путь зоны Ния – Киренга, поезд № 11 на км 858,50 в 107 мин |
| среднее 3-мин                  | 14,67*   | 1-й путь зоны Ния – Киренга поезд № 11 на км 857,60            |
| Огр. темпер., °С: в тяг. сети  | 123*     | (доп. 120° 3 мин) К5 ЭЧЭ Якурим                                |
| в отсасывающей линии           | 22       | (доп. 90° 20 мин) ЭЧЭ Якурим                                   |

**Таблица 5 - Нагрузки трансформаторов тяговых подстанций**

| Наименование подстанции | Плечо  | Wа, кВт·ч | Wр, квар·ч | Ук.ср, кВ | Уп.ср, кВ | T=1 мин<br>Кдоп=2 | 10<br>1,5 | 60<br>- | средн.<br>- | Темп., об-мот. | °С<br>масла |
|-------------------------|--------|-----------|------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|---------|-------------|----------------|-------------|
| Якурим                  | Левое  | 0         | 0          | 27,39     | 27,39     | 0,00              | 0,00      | 0,00    | 0,00        | 65             | 65          |
|                         | Правое | 188139    | 489707     | 25,18     | 25,51     | 1,63              | 1,34      | 1,07    | 0,59        | 103            | 79          |
| Звездная                | Левое  | 172984    | 404395     | 25,24     | 25,56     | 1,54              | 1,15      | 0,91    | 0,50        | 92             | 73          |
|                         | Правое | 66685     | 88736      | 26,53     | 26,66     | 0,65              | 0,43      | 0,36    | 0,24        | 65             | 65          |
| Ния                     | Левое  | 118123    | 72262      | 26,49     | 26,63     | 1,13              | 0,57      | 0,45    | 0,28        | 67             | 65          |
|                         | Правое | 226951    | 352660     | 25,40     | 25,63     | 1,58              | 1,25      | 0,80    | 0,48        | 91             | 70          |
| Киренга                 | Левое  | 193213    | 257892     | 25,17     | 25,35     | 1,16              | 0,90      | 0,66    | 0,38        | 80             | 67          |
|                         | Правое | 0         | 0          | 27,25     | 27,25     | 0,00              | 0,00      | 0,00    | 0,00        | 65             | 65          |

**Таблица 6 - Коэффициенты нагрузки и нагрев автотрансформаторов**

| Наименование АТП, ПСА | Путь | T=1 мин<br>Кдоп=2 | 10<br>1,5 | 60<br>- | средн.<br>- | Темп., обмот. | °С<br>масла |
|-----------------------|------|-------------------|-----------|---------|-------------|---------------|-------------|
| АТП 741-й км          | 1-й  | 2,24              | 1,74      | 0,81    | 0,27        | 107           | 71          |
|                       | 2-й  | 1,03              | 0,74      | 0,47    | 0,32        | 74            | 65          |
| АТП 748-й км          | 1-й  | 2,10              | 1,60      | 0,75    | 0,25        | 100           | 69          |
|                       | 2-й  | 1,09              | 0,84      | 0,42    | 0,31        | 73            | 65          |
| АТП 754-й км          | 1-й  | 2,01              | 1,27      | 0,65    | 0,25        | 89            | 65          |
|                       | 2-й  | 1,01              | 0,81      | 0,44    | 0,31        | 73            | 65          |
| ПСА Чудничный         | 1-й  | 1,28              | 1,20      | 0,77    | 0,35        | 89            | 68          |
|                       | 2-й  | 1,28              | 1,20      | 0,77    | 0,35        | 89            | 68          |
| АТП 775-й км          | 1-й  | 2,30              | 1,65      | 1,01    | 0,38        | 108           | 77          |
|                       | 2-й  | 1,01              | 0,70      | 0,50    | 0,34        | 72            | 65          |
| АТП 794 км            | 1-й  | 0,50              | 0,23      | 0,15    | 0,08        | 65            | 65          |
|                       | 2-й  | 0,57              | 0,29      | 0,17    | 0,12        | 65            | 65          |
| ПСА Ирдыкан           | 1-й  | 0,45              | 0,27      | 0,18    | 0,11        | 65            | 65          |
|                       | 2-й  | 0,45              | 0,27      | 0,18    | 0,11        | 65            | 65          |
| АТП 814 км            | 1-й  | 0,54              | 0,38      | 0,22    | 0,10        | 65            | 65          |
|                       | 2-й  | 0,65              | 0,41      | 0,21    | 0,13        | 65            | 65          |
| АТП 832 км            | 1-й  | 0,82              | 0,55      | 0,38    | 0,15        | 67            | 65          |

|            |     |      |      |      |      |    |    |
|------------|-----|------|------|------|------|----|----|
|            | 2-й | 0,69 | 0,50 | 0,29 | 0,21 | 65 | 65 |
| АТП 842 км | 1-й | 1,61 | 1,21 | 0,73 | 0,26 | 90 | 69 |
|            | 2-й | 1,12 | 0,82 | 0,43 | 0,30 | 71 | 65 |
| ПСА Небель | 1-й | 1,47 | 1,11 | 0,56 | 0,30 | 83 | 65 |
|            | 2-й | 1,47 | 1,11 | 0,56 | 0,30 | 83 | 65 |
| АТП 866 км | 1-й | 1,25 | 1,04 | 0,85 | 0,33 | 90 | 72 |
|            | 2-й | 0,76 | 0,53 | 0,30 | 0,23 | 65 | 65 |
| АТП 877 км | 1-й | 1,16 | 0,93 | 0,74 | 0,28 | 82 | 69 |

**Таблица 7 – Нагрев проводов тяговой сети в точках подключения фидеров**

| Подстанция Якурим   |        |       |        |           |       |        |                |
|---------------------|--------|-------|--------|-----------|-------|--------|----------------|
| Фидер               | Ток, А |       |        | Темп., °С |       |        | Марки проводов |
|                     | 1 мин  | 3 мин | 20 мин | 1 мин     | 3 мин | 20 мин |                |
| К5-п                | 1437   | 1403  | 979    | 126       | 123   | 82     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| К4-п                | 950    | 836   | 621    | 47        | 47    | 41     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| П5-п                | 663    | 644   | 567    | 69        | 68    | 57     | А-185          |
| П4-п                | 552    | 531   | 435    | 46        | 45    | 41     | А-185          |
| Отс.                | 618    | 584   | 282    | 25        | 24    | 22     | 2А-185         |
| Подстанция Звездная |        |       |        |           |       |        |                |
| Фидер               | Ток, А |       |        | Темп., °С |       |        | Марки проводов |
|                     | 1 мин  | 3 мин | 20 мин | 1 мин     | 3 мин | 20 мин |                |
| К1-л                | 1214   | 1129  | 718    | 72        | 69    | 52     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| К2-л                | 649    | 590   | 401    | 32        | 31    | 28     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| П1-л                | 652    | 609   | 429    | 49        | 48    | 42     | А-185          |
| П2-л                | 425    | 365   | 315    | 32        | 32    | 30     | А-185          |
| К5-п                | 242    | 184   | 110    | 21        | 21    | 21     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| К4-п                | 248    | 233   | 126    | 21        | 21    | 21     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| П5-п                | 140    | 104   | 76     | 21        | 20    | 20     | А-185          |
| П4-п                | 140    | 104   | 77     | 21        | 20    | 20     | А-185          |
| Отс.                | 607    | 458   | 272    | 21        | 21    | 21     | 3А-185         |
| Подстанция Ния      |        |       |        |           |       |        |                |
| Фидер               | Ток, А |       |        | Темп., °С |       |        | Марки проводов |
|                     | 1 мин  | 3 мин | 20 мин | 1 мин     | 3 мин | 20 мин |                |
| К1-л                | 595    | 441   | 161    | 25        | 25    | 22     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| К2-л                | 458    | 347   | 149    | 23        | 23    | 21     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| П1-л                | 147    | 110   | 82     | 21        | 21    | 20     | А-185          |
| П2-л                | 140    | 126   | 86     | 21        | 21    | 21     | А-185          |
| К5-п                | 900    | 778   | 531    | 47        | 44    | 37     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| К4-п                | 648    | 568   | 436    | 34        | 34    | 30     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| П5-п                | 485    | 456   | 369    | 40        | 40    | 36     | А-185          |
| П4-п                | 562    | 541   | 398    | 46        | 46    | 38     | А-185          |
| Отс.                | 476    | 353   | 201    | 22        | 22    | 21     | 2А-185         |
| Подстанция Киренга  |        |       |        |           |       |        |                |
| Фидер               | Ток, А |       |        | Темп., °С |       |        | Марки проводов |
|                     | 1 мин  | 3 мин | 20 мин | 1 мин     | 3 мин | 20 мин |                |
| К1-л                | 972    | 782   | 566    | 48        | 45    | 39     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| К2-л                | 331    | 321   | 243    | 23        | 23    | 23     | ПБСМ-95+МФ-100 |
| П1-л                | 483    | 467   | 353    | 39        | 39    | 34     | А-185          |
| П2-л                | 324    | 300   | 243    | 27        | 27    | 26     | А-185          |
| Отс.                | 570    | 384   | 224    | 22        | 22    | 21     | 2А-185         |

**Таблица 8 - Минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов**

| Межподстанционная зона | Путь | Uэ, В  |       | Поезд №, на km |
|------------------------|------|--------|-------|----------------|
|                        |      | миним. | 3-мин |                |
| Якурим - Звездная      | 1-й  | 15,10  | 15,85 | № 11, 769,70   |
|                        | 2-й  | 16,42  | 16,97 | № 12, 755,38   |
| Звездная - Ния         | 1-й  | 23,44  | 24,36 | № 11, 819,18   |
|                        | 2-й  | 23,75  | 24,32 | № 6, 809,06    |
| Ния - Киренга          | 1-й  | 13,97  | 14,67 | № 11, 857,60   |
|                        | 2-й  | 15,84  | 16,47 | № 2, 844,87    |

**Таблица 9 – Расход и потери электроэнергии**

| Наименования энергосистем | Полный, кВт·А·ч | Активн, кВт·ч | Потери нагр. | в тр-рах х. х. |
|---------------------------|-----------------|---------------|--------------|----------------|
| Якурим                    | 524604          | 188139        | 2180,9       | 1440,0         |
| Звездная                  | 548289          | 239670        | 1771,0       | 2160,0         |
| Ния                       | 547389          | 345074        | 1818,1       | 2160,0         |
| Киренга                   | 322242          | 193213        | 862,4        | 1248,0         |
| Всего по участку          | 1942523         | 966092        | 6632,4       | 7008,0         |

Исходя из значений полученных результатов, наблюдаются значительные отклонения от допустимых пределов по параметрам напряжения (13,97кВ, мин. Допустимое 21кВ), превышение допустимого коэффициента нагрузки АТП (2,3 при максимально допустимом 2,0), превышение нагрева проводов контактной сети (123 градуса). Потери в тяговой сети составляют 10% и равны 96456 кВт·ч.

Для решения задачи повышения пропускной способности рассматриваемого участка, необходимо применить комплекс мер по усилению тяговой сети:

Этап 1 (этот вариант обеспечивает пропускную способность при графике движения состоящего из поездов массой 7100 тонн, в соответствии с требованиями паспорта инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)» на конец 2024 года:

- установка новых АТП на 768 км участка Чудничный – Звездная, на 848 км. Участка Ния- Небель, на 860 и 884 км. участка Небель – Киренга. И создание параллельной схемы секционирования контактной сети на участках Якурим – Звездная и Ния – Киренга;

- установка КУ на ПСА Чудничный, и шинах КС ТП Якурим (п.п.), ТП Звездная (л.п.), ТП Ния (п.п.), ТП Киренга (л.п.);

- установка УПК на шинах КС ТП Якурим (п.п. – 3200 кВАр), ТП Звездная (л.п. – 3200 кВАр), ТП Ния (п.п. – 4000 кВАр), ТП Киренга (л.п. – 4000 кВАр), ПСА Небель (4000 кВАр);

- модернизация КС на участке Ния-Киренга (замена ПБСМ-95 на М-95);

- повышение мощности КУ на п.п. ТП Ния (до 11250 кВАр), л.п. ТП Киренга (6000 кВАр) и на ПСА Небель (11250 кВАр), установка дополнительного АТП на 826-м км.

Этап 2 :

- размещение новой ТП Небель (на месте ПСА Небель);

Этап 3:

- применение узловых схемы секционирования КС на МПЗ Ния –Небель и Небель – Киренга. Повышение мощности КУ на ПС Чудничный, п.п. ТП Якурим и л.п. ТП Звездная до 11250 кВАр. Установка в параллельную работу 2-х ТП на п.п. ТП Небель. Модернизация КС на участке Якурим – Звездная (замена ПБСМ-95 на М-95). Отключение УПК на п.п. ТП Киренга.

Результаты усиления представлены в таблицах 10, 11. Итоговая схема представлена на рисунке 8.

### **Заключение**

Для обеспечения перспективного графика движения, состоящего из поездов массой 14 200 тонн (сдвоенных 7100 и 7100 тонн) необходимо в значительной степени произвести модернизацию системы тягового электроснабжения 2х25кВ, в том числе разместить новую ТП на месте поста секционирования Небель.

Необходимо рассмотреть установку активных оптимизирующих устройств, имеющих плавное управление и интеллектуальный подход [8-12] к решению задач обеспечения пропускной способности, энергоэффективности и повышения качества электрической энергии.

**Таблица 10 – Применение комплекса мер по повышению перспективной пропускной способности**

| Участок           | Расход энергии |                 | Минимальное напряжение, кВ | Вариант усиления |
|-------------------|----------------|-----------------|----------------------------|------------------|
|                   | полной, кВАр·ч | активной, кВр·ч |                            |                  |
| Якурим - Звездная | 964276         | 361123          | 15,10                      | Без усиления     |
|                   | 702089         | 371558          | 19,11                      | 1                |
|                   | 702211         | 371549          | 19,11                      | 2                |
|                   | 406485         | 376689          | 21,06                      | 3                |
| Звездная - Ния    | 246597         | 186823          | 22,25                      | 3                |
| Ния- Киренга      | 741156         | 420164          | 13,97                      | Без усиления     |
|                   | 450534         | 443458          | 18,25                      | 1                |
|                   | 437266         | 544649          | 20,1                       | 2                |
|                   | 440196         | 546933          | 21,65                      | 3                |

**Таблица 11 – Результаты влияния комплекса мер на изменения потерь электроэнергии**

| Усиление     | Расход энергии     |                 | Потери в ТТ     |             | Потери в АТ, кВт·ч | Потери в ТС, кВт·ч |
|--------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------|--------------------|--------------------|
|              | реактивной, кВАр·ч | активной, кВт·ч | Нагрузка, кВт·ч | х.х., кВт·ч |                    |                    |
| Без усиления | 16656661           | 966092          |                 |             | 5616               | 96456 (10,0)       |
| 1            | 835667             | 1000988         | 4587            | 7008        | 7776               | 67826 (6,8)        |
| 2            | 995237             | 1054889         | 5201            | 8448        | 7344               | 59781 (6,0)        |
| 3            | 612701             | 1003711         | 4036            | 9168        | 8208               | 44633 (4,4)        |



**Рис. 8. Схема участка**

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. 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)»»
2. 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.

3. 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.
4. П.А. Капранов. Реконструкция районов электрических сетей с целью снижения потерь мощности. / П.А. Капранов, Е.Ю. Пузина. / Изд.: Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону). 2020. - 113-116 с.
5. Воронина Е.В., Куцкий А.П. Модернизация пути и повышение пропускной способности однопутного электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга // Молодая наука Сибири. 2021. № 3 (13). С. 196-204.
6. Воронина Е.В., Куцкий А.П. Повышение качества электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 118-125.
7. 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.
8. 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.
9. Черепанов А.В., Куцкий А.П. Использование управляемых источников реактивной мощности в системах тягового электроснабжения. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 9(116). С. 103-110.
10. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Куцкий А.П. Моделирование несинусоидальных режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками компенсации реактивной мощности//Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 1 (57). С. 72-79.
11. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Куцкий А.П. Мультиагентный подход к управлению режимами систем электроснабжения железных дорог // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4 (123). С. 108-126. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-108-126.
12. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Мультиагентные технологии управления в системах электроснабжения с активными потребителями // Труды Братского государственного университета. Серия Естественные и инженерные науки. 2016. Т. 2. С. 145-154.

## REFERENCES

1. 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)""
2. Puzina E.Yu., Perelygin V.M. Strengthening of the traction power supply system of the Yakurim-Zvezdnaya section of the VSZHD. Transport-2013: Proceedings of the International Scientific and practical conference. Rostov-on-Don: Publishing House of RSUPS, 2013.-pp. 176-178.
3. Strengthening of the traction power supply system of the Churo-Taksimo 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.
4. P.A. Kapranov. Reconstruction of areas of electric networks in order to reduce power losses. / P.A. Kapranov, E.Yu. Puzina. / Ed.: Rostov State University of Railways (Rostov-on-Don). 2020. - 113-116 p.
5. Voronina E.V., Kutsy A.P. Modernization of the track and increasing the capacity of a single-track electrified section of the Yakurim – Kirenga railway // Molodaya nauka Sibiri. 2021. No. 3 (13). pp. 196-204.
6. Voronina E.V., Kutsy A.P. Improving the quality of electric energy in the power supply systems of railways // Molodaya nauka Sibiri. 2021. No. 2 (12). pp. 118-125.

7. Puzina E.Yu. Strengthening 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. Materials of the Sixth International Symposium "Eltrans-2011". 2013. pp. 464-468.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Quality management of electrical energy in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2015, 180 p. of intelligent networks (SMART GRID). Irkutsk: IrGUPS, pp: 412.
9. Cherepanov A.V., Kutsyy A.P. The use of controlled reactive power sources in traction power supply systems. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2016. Vol. 20. No. 9(116). pp. 103-110.
10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kutsyy A.P. Modeling of non-sinusoidal modes of traction power supply systems equipped with reactive power compensation units//Modern technologies. System analysis. Modeling. 2018. No. 1 (57). pp. 72-79.
11. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kutsy A.P. Multi-agent approach to managing modes of railway power supply systems // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. Vol. 21. No. 4 (123). pp. 108-126. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-108-126.
12. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Multi-agent control technologies in power supply systems with active consumers // Proceedings of the Bratsk State University. Natural and Engineering Sciences series. 2016. Vol. 2. pp. 145-154.

#### **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

*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

*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.