

А.П. Куцый, П.Н. Коношанов

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

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ВСЖД

Аннотация. В работе рассмотрена эффективность применения параллельной работы трансформаторов для снижения потерь электрической энергии и повышения уровня напряжения на шинах тяговых подстанций и токоприемниках локомотивов. Моделирование проводилось в программном комплексе «КОРТЭС» для реального участка ВСЖД состоящего из 7 межподстанционных зон.

Ключевые слова: тяговый трансформатор, потери электрической энергии, параллельная работа тяговых трансформаторов, система тягового электроснабжения, ПК «КОРТЭС».

A.P. Kutsyi, P.N. Konoshanov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SWITCHING TRANSFORMERS INTO PARALLEL OPERATION AT TRACTION SUBSTATIONS OF THE RUSSIAN RAILWAYS

Annotation. The paper considers the effectiveness of using parallel operation of transformers to reduce electrical energy losses and increase the voltage level on the tines of traction substations and current collectors of locomotives. The simulation was carried out in the KORTES software package for a real section of the Russian Railways consisting of 7 substation zones.

Keywords: traction transformer, electric energy losses, parallel operation of traction transformers, traction power supply system, PC «KORTES»

Введение

Параллельная работа трансформаторов – это такое включение двух и более трансформаторов, при котором соединяются между собой одноименные обмотки низкого и высокого напряжения этих трансформаторов называется параллельная работа трансформаторов. Если у трансформаторов соединен только один номинал обмоток, то это называется совместной работой трансформаторов.

Условия подключения трансформаторов в параллельную работу обозначены в пункте 2.1.19 ПТЭЭП:

Допускается параллельная работа трансформаторов (автотрансформаторов) при условии, что ни одна из обмоток не будет нагружена током, превышающим допустимый ток для данной обмотки.

Параллельная работа трансформаторов разрешается при следующих условиях:

- группы соединений обмоток одинаковы;
- соотношение мощностей трансформаторов не более 1:3;
- коэффициенты трансформации отличаются не более чем на 0,5%;
- напряжения короткого замыкания отличаются не более чем на 10%;
- произведена фазировка трансформаторов.

Для выравнивания нагрузки между параллельно работающими трансформаторами с различными напряжениями короткого замыкания допускается в небольших пределах изменение коэффициента трансформации путем переключения ответвлений при условии, что ни один из трансформаторов не будет перегружен [1-2].

Выбор оптимального режима эксплуатации трансформаторов

На двух и более трансформаторных подстанциях число включенных трансформаторов по условиям наименьших потерь определяется условием, обеспечивающим минимум потерь мощности в этих трансформаторах при работе их по заданному графику нагрузок.

Потери мощности в трансформаторе складываются из потерь в стали сердечника (потери холостого хода) и потерь в обмотках трансформатора (потери короткого замыкания). Потери в стали сердечника не зависят от нагрузки трансформатора, а потери в обмотках изменяются пропорционально квадрату нагрузки (мощности S или тока I). В паспортных данных для каждого типа трансформатора приводится значение потерь короткого замыкания для номинальной нагрузки.

Суммарные потери мощности в одном трансформаторе при нагрузке S определяются зависимостью

$$(\Sigma P)_1 = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кн} \cdot \left(\frac{S}{S_H}\right)^2 = \Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_{кн}}{S_H^2} \cdot S^2, \quad (1)$$

где S - заданная нагрузка;

S_H - номинальная мощность трансформатора.

Эта зависимость имеет вид, показанный на рисунке 3.2.

Суммарные потери в двух однотипных трансформаторах при общей нагрузке S определяются зависимостью

$$(\Sigma P)_2 = 2 \cdot \Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_{кн}}{2 \cdot S_H^2} \cdot S^2. \quad (2)$$

Зависимость имеет вид, показанный на рисунке 1. При значении $S_{гр}$ (граничная мощность) потери мощности в одном трансформаторе и двух одновременно включенных оказываются равными.

Величину $S_{гр}$ можно получить по формуле

$$S_{гр} = S_H \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{xx}}{\Delta P_{кн}}}, \quad (3)$$

Величина $S_{гр}$ имеет важное практическое значение, т.к. позволяет выбрать оптимальный режим эксплуатации трансформаторной подстанции. При нагрузках S меньше $S_{гр}$ целесообразна работа при включении одного трансформатора, при S больше $S_{гр}$ целесообразно включать два трансформатора. При этом достигается минимум потерь мощности и энергии.

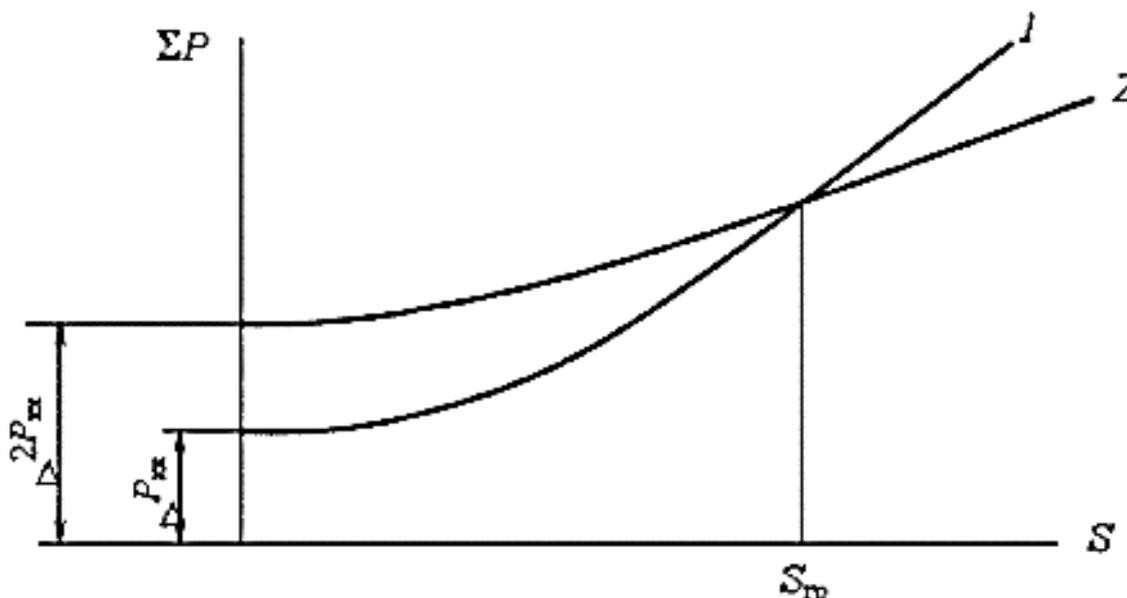


Рисунок 1 – Зависимость потерь мощности от нагрузки при включении одного и двух трансформаторов

Дальнейшее исследование эффективности применения двух трансформаторов в параллельной работе будет строиться на результатах моделирования реального участка ВСЖД состоящего из 7 межподстанционных зон. Графиком движения является среднесуточный

график движения грузовых поездов в 2023 году. Для удобства поименуем тяговые подстанции рассматриваемого участка следующим образом: ТП₁, ТП₂, ТП₃, ТП₄, ТП₅, ТП₆, ТП₇, ТП₈, ТП₉. Моделирование будем осуществлять в программном комплексе «КОРТЭС».

Эффект применения двух тяговых трансформаторов по уровню напряжения

Включение тяговых трансформаторов в параллельную работу при максимальных нагрузках, в том числе превышающих номинал тягового трансформатора, позволяет значительно повысить напряжение на шинах 27.5 кВ ТП и получить эффект его стабилизации [3-5].

Эффективность увеличения напряжения на шинах данных тяговых подстанций и эффект экономии электроэнергии от повышения напряжения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение эффективности включения тяговых трансформаторов по условию уменьшения потерь активной электроэнергии в результате подъема уровня напряжения в контактной сети при включении трансформаторов в параллельную работу

| МПЗ | Включение в параллельную работу | Сред. уровень напряжения на токоприемнике | Среднее потребление активной эл. энергии W _a , кВт · ч | Средний суммарный ток всех фидеров обоих т/пс I _{ср} , А | Длина МПЗ, км | Средние потери эл. энергии в к/сети ΔW _{кc} , кВт · час | Эконом. эл. энер, кВт·ч |
|--|---------------------------------|---|---|---|---------------|--|-------------------------|
| ТП ₁ -ТП ₂ | Выкл | 20,65 | 53499 | 2590,75 | 44 | 1679,68 | 190,40 |
| | Вкл | 21,93 | | 2439,50 | | 1489,28 | |
| ТП ₂ -ТП ₃ | Выкл | 23,30 | 47060 | 2019,74 | 43 | 997,66 | 113,09 |
| | Вкл | 24,74 | | 1901,83 | | 884,57 | |
| ТП ₃ -ТП ₄ | Выкл | 19,46 | 61163 | 3143,01 | 41 | 2303,55 | 261,11 |
| | Вкл | 20,67 | | 2959,52 | | 2042,43 | |
| ТП ₄ -ТП ₅ | Выкл | 23,36 | 44810 | 1918,24 | 32 | 669,69 | 75,91 |
| | Вкл | 24,81 | | 1806,25 | | 593,78 | |
| ТП ₅ -ТП ₆ | Выкл | 19,20 | 63515 | 3308,07 | 46 | 2863,05 | 324,53 |
| | Вкл | 20,39 | | 3114,95 | | 2538,52 | |
| ТП ₇ -ТП ₈ | Выкл | 21,29 | 62948 | 2956,69 | 44 | 2187,69 | 247,98 |
| | Вкл | 22,61 | | 2784,08 | | 1939,71 | |
| ТП ₈ -ТП ₉ | Выкл | 20,11 | 77716 | 3864,55 | 54 | 4586,82 | 519,93 |
| | Вкл | 21,36 | | 3638,93 | | 4066,89 | |
| Суммарная экономия электроэнергии | | | | | | | 1732,95 |

Экономия электроэнергии определяется разностью суммарных потерь электроэнергии без включения трансформаторов в параллель и суммарных потерь электроэнергии при включении трансформаторов в параллель. Суммарные потери электроэнергии в контактной сети определяются по формуле

$$\Delta W_{кc} = 2 \cdot \left(\frac{I_{ср}}{2}\right) \cdot \frac{R_{кc}}{1000}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (4)$$

где $I_{ср}$ - средний ток тяговой нагрузки;

$R_{кc}$ - активное сопротивление контактной подвески до середины МПЗ.

Величину $R_{кc}$ можно получить по формуле

$$R_{кc} = R_{уд} \cdot \frac{L_{МПЗ}}{2}, \text{ Ом}, \quad (5)$$

где $R_{уд}$ - удельное сопротивление контактной подвески, для контактной подвески МФ-100+ПБСМ-70+4Р-65 - $R_{уд} = 0,182$ Ом/км.

Эффект применения двух тяговых трансформаторов по повышению КПД и загрузки трансформаторов

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется отношением отдаваемой полезной мощности к мощности на входе трансформатора и рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{СТ} + \Delta P_M}, \quad (6)$$

где P_2 - полезная мощность на выходе трансформатора;

P_1 - мощность на входе трансформатора с учетом потерь мощности;

$\Delta P_{СТ}$ - мощность потерь в стали на намагничивание магнитопровода;

ΔP_M - мощность потерь в «меди», обусловленное нагрузочными токами в обмотках.

Для определения потерь электроэнергии в трансформаторе используется следующая зависимость

$$\Delta W_T = \Delta W_{XX} + \Delta W_H, \quad (7)$$

где $\Delta W_{XX} = \Delta P_{СТ} = 36 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ - потери электроэнергии в стали на намагничивание магнитопровода, и определяется по справочным данным для трансформатора ТДТНЖ-40000 кВА;

$\Delta W_H = \Delta P_M$ - потери электроэнергии в «меди», обусловленное нагрузочными токами в обмотках, которые находится по следующей формуле

$$\Delta W_H = K_K \cdot T_p \cdot K_{\phi^2} \cdot \Delta P_{CP}, \quad (8)$$

где K_K - коэффициент различия конфигураций, принимаемый 0.99;

$T_p = 1$ час - расчетное время;

K_{ϕ^2} - квадрат коэффициента формы графика за расчетный период;

ΔP_{CP} - потери мощности в силовом трансформаторе, кВт, которые определяется по формуле

$$\Delta P_{CP} = 3 \cdot I_{CP}^2 \cdot R \cdot 10, \quad (9)$$

где I_{CP} - средний ток трансформатора, который определен из расчетов программного комплекса КОРТЭС главы 2, таблицы 2.1 и берется величина ток отсоса равная 20 мин.;

R - активное сопротивление трансформатора, приведенное к обмотке 27,5 кВ, $R=0,0945 \text{ ом/ф}$;

K_{ϕ^2} - квадрат коэффициента формы графика за расчетный период можно определить по формуле

$$K_{\phi^2} = \frac{1+2 \cdot K_3}{3 \cdot K_3}, \quad (10)$$

где K_3 - коэффициент загрузки трансформатора за расчетный период, который определяется зависимостью

$$K_3 = \frac{W_a}{S_H \cdot T_p \cdot \cos \varphi} \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где W_a - потребленная активная электроэнергия за один час, которая определена сумой плеч питания на ТП;

S_H - номинальная мощность трансформатора равная 40000Ква;

$\cos \varphi$ - отношение активной мощности к полной мощности нагрузки, для питания ЭПС $\cos \varphi = 0,8$.

В данной работе произведен расчет потерь электроэнергии в трансформаторе при условии включения трансформаторов в параллельную работу и эксплуатации их в оптимальном нагрузочном режиме. Так же определен эффект экономии электроэнергии, мощности и КПД [6,7]. Все результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение эффективности включения тяговых трансформаторов по условию уменьшения потерь активной электроэнергии

| ТПС | Положение трансформаторов | Потери х.х. ΔW_{xx} , кВт*час | Потери на нагрузочные ΔW_n , кВт*ч | Среднее потребление активной эл. энергии W_a , кВт*ч | Коэффициент загрузки, Кз | Форма графика-коэффициент, Кф ² | Потери активной мощности в трансформаторе, $\Delta P_{пр}$, кВт | Средний ток трансформатора по I _{ср.} , А | Сумма $\Delta W_{т-г}$ на т/пс, кВт*час | Сумма на т/пс | Экономия эл. энергии, кВт*ч |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------------|--|--|--------------------------|--|--|--|---|---------------|-----------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| ТП ₁ | Раздел бно | 36 | 159,97 | 42458 | 1,33 | 0,92 | 176,04 | 788,00 | 195,97 | 233,66 | 57,70 |
| | | 36 | 1,69 | | 0,04 | 8,29 | 0,21 | | 26,97 | | |
| | Паралл ель | 36 | 50,94 | 21229 | 0,66 | 1,17 | 44,01 | 394,00 | 86,94 | 175,96 | |
| | | 36 | 50,94 | | 0,66 | 1,17 | 44,01 | | 86,94 | | |
| | | 0 | 2,09 | | 1400 | 0,04 | 8,29 | | 0,25 | | |
| ТП ₂ | Раздел бно | 36 | 411,76 | 59113 | 1,85 | 0,85 | 490,98 | 1316,0 | 447,76 | 484,33 | 162,02 |
| | | 36 | 0,57 | | 500 | 0,02 | 22,0 | | 0,03 | | |
| | Паралл ель | 36 | 124,87 | 29556 | 0,92 | 1,03 | 122,75 | 658,00 | 160,87 | 322,30 | |
| | | 36 | 124,87 | | 0,92 | 1,03 | 122,75 | | 160,87 | | |
| | | 0 | 0,57 | | 500 | 0,02 | 22,0 | | 0,03 | | |
| ТП ₃ | Раздел бно | 36 | 553,01 | 53390 | 1,67 | 0,87 | 644,70 | 1508,0 | 589,01 | 633,59 | 212,75 |
| | | 36 | 8,58 | | 300 | 0,01 | 36,22 | | 0,24 | | |
| | Паралл ель | 36 | 170,13 | 26695 | 0,83 | 1,07 | 161,17 | 754,00 | 206,13 | 420,84 | |
| | | 36 | 170,13 | | 0,83 | 1,07 | 161,17 | | 206,13 | | |
| | | 0 | 8,58 | | 300 | 0,01 | 36,22 | | 0,24 | | |
| ТП ₄ | Раздел бно | 36 | 752,37 | 47651 | 1,49 | 0,89 | 853,40 | 1735,0 | 788,37 | 832,93 | 281,62 |
| | | 36 | 8,57 | | 400 | 0,01 | 27,33 | | 0,32 | | |
| | Паралл ель | 36 | 235,37 | 23826 | 0,74 | 1,11 | 213,35 | 867,50 | 271,37 | 551,31 | |
| | | 36 | 235,37 | | 0,74 | 1,11 | 213,35 | | 271,37 | | |
| | | 0 | 8,57 | | 400 | 0,01 | 27,33 | | 0,32 | | |
| ТП ₅ | Раздел бно | 36 | 587,10 | 61515 | 1,92 | 0,84 | 705,94 | 1578,0 | 666,30 | 738,64 | 211,36 |
| | | 36 | 0,34 | | 17000 | 0,53 | 1,29 | | 0,26 | | |
| | Паралл ель | 36 | 177,07 | 30758 | 0,96 | 1,01 | 176,48 | 789,00 | 241,87 | 527,28 | |
| ТП ₆ | Раздел бно | 36 | 550,62 | 61833 | 1,93 | 0,84 | 662,78 | 1529,00 | 586,62 | 627,12 | 218,72 |
| | | 36 | 4,49 | | 600 | 0,02 | 18,44 | | 0,25 | | |
| | Паралл ель | 36 | 165,95 | 30917 | 0,97 | 1,01 | 165,69 | 764,50 | 201,95 | 408,40 | |
| | | 36 | 165,95 | | 0,97 | 1,01 | 165,69 | | 201,95 | | |
| | | 0 | 4,49 | | 600 | 0,02 | 18,44 | | 0,25 | | |
| ТП ₇ | Раздел бно | 36 | 514,99 | 55616 | 1,74 | 0,86 | 605,97 | 1462,00 | 550,99 | 824,71 | 199,97 |
| | | 36 | 237,72 | | 10 | 0,00 | 1067,33 | | 0,22 | | |
| | Паралл ель | 36 | 157,51 | 27808 | 0,87 | 1,05 | 151,49 | 731,00 | 193,51 | 624,74 | |
| | | 36 | 157,51 | | 0,87 | 1,05 | 151,49 | | 193,51 | | |
| | | 0 | 237,72 | | 10 | 0,00 | 1067,33 | | 0,22 | | |
| ТП ₈ | Раздел бно | 36 | 397,72 | 75275 | 2,35 | 0,81 | 496,97 | 1324,0 | 433,72 | 470,81 | 164,00 |
| | | 36 | 1,10 | | 2000 | 0,06 | 6,00 | | 0,18 | | |
| | Паралл ель | 36 | 116,86 | 37638 | 1,18 | 0,95 | 124,24 | 662,00 | 152,86 | 306,81 | |
| | | 36 | 116,86 | | 1,18 | 0,95 | 124,24 | | 152,86 | | |
| | | 0 | 1,10 | | 2000 | 0,06 | 6,00 | | 0,18 | | |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--|----|--------|-------|------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| ТП ₉ | Раздел бно | 36 | 382,75 | 52461 | 1,64 | 0,87 | 444,39 | 1252,00 | 418,75 | 629,03 | 146,65 |
| | | 36 | 174,28 | 10 | 0,00 | 1067,33 | 0,16 | 24,12 | 210,28 | | |
| | Паралл ель | 36 | 118,05 | 26231 | 0,82 | 1,07 | 111,10 | 626,00 | 154,05 | 482,38 | |
| | | 36 | 118,05 | | 0,82 | 1,07 | 111,10 | | 154,05 | | |
| | | 0 | 174,28 | 10 | 0,00 | 1067,33 | 0,16 | 24,12 | 174,28 | | |
| | Суммарная экономия электроэнергии | | | | | | | | | | |

Выводы

В результате расчетов выявлено, что использование в параллельной работе тяговых трансформаторов на тяговых подстанциях, загруженных более 90% от номинальной мощности одного трансформатора приводит к существенной экономии электроэнергии обусловленной значительным снижением потерь от нагрузочных токов. При использовании в параллельной работе на выше указанных подстанциях суммарная экономия электроэнергии будет составлять 1654,79 кВт·ч, а за счет повышения напряжения на токоприемниках ЭПС экономия электроэнергии составляет 1732,95 кВт·ч, что в сумме даст экономию электрической энергии в размере 3387,74 кВт·ч

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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)
2. 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)
3. Куцый А.П. Снижение несимметрии и несинусоидальности в линиях электропередач, питающих тяговые подстанции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 1. С. 692-696.
4. Черепанов А.В. Тихомиров В.А., Куцый А.П. Снижение несимметрии и гармонических искажений в районах электроснабжения нетяговых потребителей. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2017. - №3 (55). - С. 145-151.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Куцый А.П. Моделирование несинусоидальных режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками компенсации реактивной мощности//Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 1 (57). С. 72-79.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2018615172, 12.03.2018 Имитационная динамическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ// Ушаков В.А., Куцый А.П., Черепанов А.В.
7. Арсентьев Г.О., Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Куцый А.П., Нгуен В.Х., Черепанов А.В., Чан З.Х., 2019. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (SMART GRID). Иркутск: ИрГУПС, pp: 412.

REFERENCES

1. Kutsyi 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)
2. Kutsyi A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Increasing the capacity of the Yakurim - Kirenga section to ensure the timetable of trains with a maximum weight of 7,100 tons. // Electronic scientific journal "Young Science of Siberia". 2022. № 2(16)

3. Kutsyi A.P. Reduction of asymmetry and non-sinusoidality in power transmission lines feeding traction substations // Transport infrastructure of the Siberian region. 2018. Vol. 1. pp. 692-696.

4. Cherepanov A.V. Tikhomirov V.A., Kutsyi A.P. Reduction of asymmetry and harmonic distortions in areas of power supply to non-power consumers. Modern technologies. System analysis. Modeling. - 2017. - №3 (55). - Pp. 145-151.

5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kutsyi 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.

6. Certificate of registration of the computer program RUS 2018615172, 03/12/2018 Simulation dynamic model of a 25 kV AC traction power supply system// Ushakov V.A., Kutsyi A.P., Cherepanov A.V.

7. Arsentiev G.O., Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kutsyi A.P., Nguyen V.H., Cherepanov A.V., Chan Z.H., 2019. Management of modes of railway power supply systems based on SMART GRID technologies. Irkutsk: IrGUPS, pp: 412.

Информация об авторах

Куцкий Антон Павлович – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru.

Коношанов Петр Николаевич – студент группы СОД.4-23-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru.

Information about the authors

Kutsyi Anton Pavlovich – senior student of the Department of «Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru .

Konoshanov Piotr Nikolaevich – student of the SOD.4-23-1 group, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru .