

А.П. Куцый, Д.А. Конюшкин, В.С. Чугуевкий

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ДВУХ ТЯГОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Аннотация. Обеспечение необходимой пропускной и провозной способности грузового железнодорожного транспорта является одной из важнейших задач в социально-экономическом развитии государства. Одним из ключевых ограничивающих факторов повышения объема перевозок является наличие предела доступной мощности в системах тягового электроснабжения и снижение напряжения на токоприемниках электроподвижного состава до недопустимого уровня.

Существует различные способы организационных и технических подходов к решению этой задачи. Каждый из способов имеет свои особенности и специфику. В данной статье упор сделан на использовании резервного тягового трансформатора при параллельной работе с основным тяговым трансформатором. Расчет проводился для двух режимов в организации движения поездов – в режиме «окно» и интенсивном режиме.

Ключевые слова: тяговые трансформаторы, параллельная работа, пропускная способность, напряжение, качество электрической энергии.

A.P. Kutsyi, D.A. Konyushkin, V.S. Chuguevsky

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

THE EFFICIENCY OF USING PARALLEL OPERATION OF TWO TRACTION TRANSFORMERS

Annotation. Ensuring the necessary throughput and carrying capacity of freight railway transport is one of the most important tasks in the socio-economic development of the state. One of the key limiting factors for increasing the volume of transportation is the presence of a limit on the available power in traction power supply systems and the reduction of voltage on the pantographs of electric rolling stock to an unacceptable level.

There are various organizational and technical approaches to solving this problem. Each method has its own characteristics and specifics. In this article, the emphasis is on the use of a backup traction transformer in parallel operation with the main traction transformer. The calculation was carried out for two modes in the organization of train traffic - in the “window” mode and in the intensive mode.

Key words: traction transformers, parallel operation, throughput, voltage, quality of electrical energy.

Параллельная работа тяговых трансформаторов

Параллельная работа трансформаторов - это работа трансформаторов (двух, трех и более) с параллельно включенными первичной и вторичной обмотками.

Параллельная работа нескольких трансформаторов имеет следующие технические и экономические преимущества по сравнению с работой одного мощного трансформатора:

–более надежное электроснабжение потребителей, поскольку выход из строя одного из трансформаторов не лишает потребителей энергии. Всю нагрузку или часть нагрузки вышедшего из строя трансформатора могут временно взять на себя остальные трансформаторы;

–резервная мощность при параллельном подключении трансформаторов значительно меньше, чем при питании потребителей от одного мощного трансформатора;

–в периоды пониженной нагрузки на энергосистему (в дневное время или весной и летом) некоторые трансформаторы могут отключаться. Это делает эксплуатацию подстанций более экономичной, так как снижаются потери трансформаторов на холостом ходу, а их нагрузка работает с максимальной эффективностью;

– поэтапное строительство подстанций. При подключении новых потребителей электроэнергии мощность трансформатора может быть увеличена путем добавления одного или нескольких трансформаторных выключателей для параллельной работы. Это особенно необходимо для региональных понижающих подстанций, обеспечивающих электроэнергией крупные промышленные районы. Новое строительство, электрификация различных отраслей народного хозяйства и расширение существующих предприятий требуют из года в год увеличения мощности электроустановок, что, в свою очередь, требует увеличения объема электроэнергии, подаваемой региональными подстанциями.

Параллельную работу трансформаторов следует отличать от совместной работы, когда к общей шине подключена только одна сторона.

При параллельной работе трансформаторов нагрузка между ними распределяется пропорционально их номинальной мощности только при соблюдении следующих условий

- номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора должны быть равны соответственно;

- напряжения короткого замыкания должны быть равны;

- группы соединений обмоток трансформатора должны быть одинаковыми. Другими словами, параллельные трансформаторы должны принадлежать к одной группе;

- соотношение максимальной и минимальной мощности не должно превышать 3:1.

Общая нагрузка параллельных трансформаторов должна быть такой, чтобы ни один из трансформаторов не был перегружен сверх своей допустимой нагрузки. Параллельная работа трансформаторов допускается при условии, что ни один из параллельных трансформаторов не загружен сверх допустимой нагрузки, даже если номинальное напряжение и напряжение короткого замыкания частично равны.

При параллельной работе трансформаторов с дистанционными выключателями РПН с ручным или автоматическим управлением (РПН - регулирование напряжения путем переключения ветвей обмоток трансформатора) их приводы должны переключаться с одной ветви на другую при подаче команды переключения. Для всех параллельных трансформаторов необходимо обеспечить практически одновременное завершение процесса. На всех подстанциях рассматриваемого участка установлены основной и резервные тяговые трансформаторы одинаковой марки. Соответственно выполняются все вышеперечисленные условия для включения двух трансформаторов в параллельную работу.

Анализ эффективности параллельной работы тяговых трансформаторов

Для качественного сравнения пропускной способности участка при двух разных режимах работы, необходимо обеспечить одинаковые графики движения. Для проверки пропускной способности в периоды интенсивной работы используется пакетный график - пропуск смешанного пакета в направлении большего токопотребления (четное) из поездов повышенного веса (6000т) и среднего веса (4000т) с интервалом 10 мин (каждый третий поезд - тяжелый) и пакета из поездов средней массы (4000т) с интервалом 10 мин в направлении меньшего токопотребления (нечетное) [1-5]. При этом система тягового электроснабжения должна обеспечивать устойчивую работу при минимальном интервале 10 мин. Моделирование осуществляется для суточного графика (1440 минут). Графики движения приведены на рисунках 1 и 2. [6,7]

Моделирование режимов работы рассматриваемого участка будет осуществляться с использованием программного комплекса «КОРТЭС». Результаты расчётов приведены в таблицах 1 и 2 для режима с резервным тяговым трансформатором и параллельной работой двух тяговых трансформаторов для интенсивного движения и работе в технологическое окно [8,9].

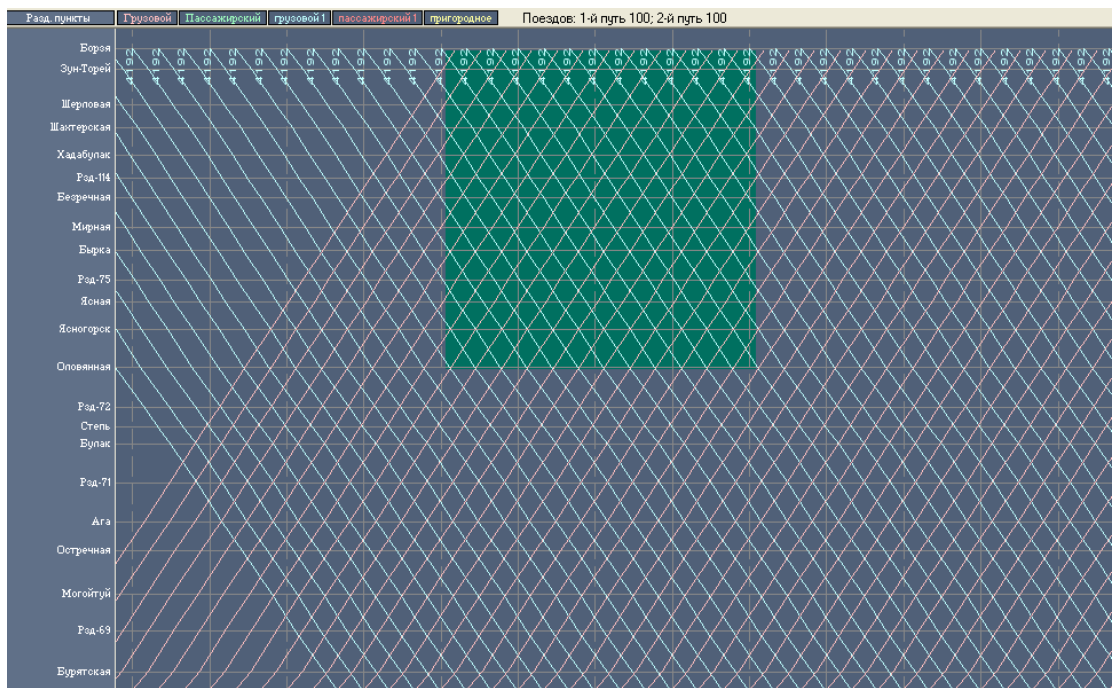


Рисунок 1 – Пакетный график для проверки пропускной способности рассматриваемого участка в интенсивные периоды работы

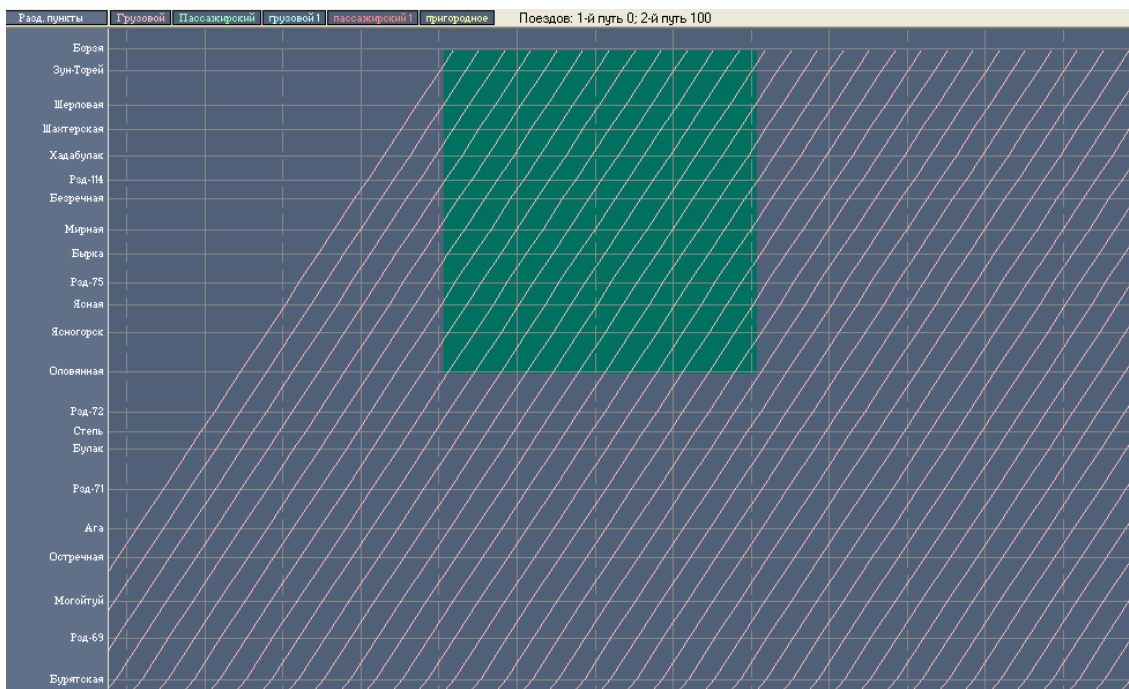


Рисунок 2 – Пакетный график для проверки пропускной способности рассматриваемого участка при работе в технологическое окно

Таблица 1 – Результаты расчета параметров системы тягового электроснабжения при работе в окно

МП 3	Тяговая подстанция	Режим работы	k пер. тр.	W полн., кВт·А·ч	W акт., кВт·ч	U min, кВ		Ифид. (1 мин.) max, А	Нагрев проводов конт. подвески, °С			W а., кВт·ч		W р., кВАр·ч		Потери в тр-х	
						1 путь	2 путь		Отс.	левое	право	левое	право	Нагр.	Х.х.		
																1 путь	2 путь
ТП 1 – ТП	ТП 1	ТП в резерве	0,85	69570	54818	-	22,6	563	46	53	40	0	22169	0	6163	66,5	52
	ТП 2		603					41	47	41	22826	12589	22884	10458	56,6	104	

2																		
ТП 1 – ТП 2	ТП 1	ТТ в параллельной работе	0,3	51110	46320	-	23,52	200	41	41	40	0	21293	0	6235	31,1	104	
	ТП 2		0,72					824	41	49	41	25026	24408	15369	6880	126,1	208	
ТП 2 – ТП 3	ТП 2	ТТ в резерве	0,64	62381	47255	-	19,69	603	41	47	41	22826	12589	22884	10458	56,6	104	
	ТП 3		1,83					914	42	41	41	20303	28127	24358	20439	417,9	104	
ТП 2 – ТП 3	ТП 2	ТТ в параллельной работе	0,72	56443	49932	-	20,95	824	41	49	41	25026	24408	15369	6880	126,1	208	
	ТП 3		0,91					978	42	53	41	25525	30235	19437	13026	193,4	208	
ТП 3 – ТП 4	ТП 3	ТТ в резерве	1,83	64433	49919	-	21,71	914	42	41	41	20303	28127	24358	20439	417,9	104	
	ТП 4		1,49					592	42	44	40	21792	0	20301	0	157,6	52	
ТП 3 – ТП 4	ТП 3	ТТ в параллельной работе	0,91	59605	53309	-	23,21	978	42	53	41	25525	30235	19437	13026	193,4	208	
	ТП 4		0,7					616	41	44	40	23074	0	13638	0	61,7	104	

Таблица 2 – Результаты расчета параметров системы тягового электроснабжения в интенсивные периоды работы

МП 3	Тяговая подстанция	Режим работы	k пер. тр.	W полн., кВт·А·ч	W акт., кВт·ч	U min, кВ		Ифид. (1 мин.)max, А	Нагрев проводов конт. подвески, °С			W а., кВт·ч		W р., кВАр·ч		Потери в тр-х	
						1 путь	2 путь		1 путь	2 путь	Отс.	левое	право	левое	право	Нагр.	X.x
ТП 1 – ТП 2	ТП 1	ТТ в резерве	1,13	10748	88123	19,7	19,26	850	52	50	42	0	41735	0	20363	132,7	52
	ТП 2		1,33					624	53	47	43	32593	33148	34833	27715	203,6	104
ТП 1 – ТП 2	ТП 1	ТТ в параллельной работе	0,77	93357	78520	20,98	20,7	634	49	44	40	0	41502	0	22729	166,2	104
	ТП 2		1,15					643	48	47	44	37018	38087	27770	15635	346,4	208
ТП 2 – ТП 3	ТП 2	ТТ в резерве	1,33	87851	67256	19,24	18,43	624	53	47	43	32593	33148	34833	27715	203,6	104
	ТП 3		2,08					744	44	49	41	26998	31288	32035	22066	583,5	104
ТП 2 – ТП 3	ТП 2	ТТ в параллельной работе	1,15	84691	71882	20,52	19,69	643	48	47	44	37018	38087	27770	15635	346,4	208
	ТП 3		1,05					812	45	50	41	33795	33645	29149	14699	276,3	208
ТП 3 – ТП 4	ТП 3	ТТ в резерве	2,08	73889	57471	20,4	20,36	744	44	49	41	26998	31288	32035	22066	583,5	104
	ТП 4		1,84					533	43	43	40	26184	0	24374	0	232,2	52
ТП 3 – ТП 4	ТП 3	ТТ в параллельной работе	1,05	70280	61704	22,22	22,17	812	45	50	41	33795	33645	29149	14699	276,3	208
	ТП 4		0,89					564	43	43	40	28059	0	18946	0	95,6	104

Заключение

Включение резервного трансформатора в параллельную работу позволило повысить уровень минимального напряжения на токоприемнике локомотива на 1-2 кВ (в зависимости

от МПЗ). Но для МПЗ ТП 1 – ТП2 и ТП 2 – ТП 3 использование только этого технического способа усиления оказалось недостаточно. Необходимо рассматривать комплексный подход для достижения допустимого значения напряжения. Включение в работу резервного трансформатора является эффективным способом повышения пропускной способности системы тягового электроснабжения железных дорог [10-13]. При оперативном и своевременном включении резервного трансформатора в параллельную работу (в случае возникновения большой тяговой нагрузки) удастся минимизировать возникновение удвоенных потерь на холостом ходу. Однако следует помнить, что включение в работу дополнительного агрегата ведет к увеличению потерь энергии за счет потерь холостого хода. Поэтому можно рекомендовать включение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Банщикова А.А. Прогнозирование объема пропуска перевозимых на нетяговом подвижном составе крупнотоннажных контейнеров в экспортно-импортном сообщении в направлении РФ-КНР / А.А. Банщикова, М.П. Базилевский, В.А. Тихомиров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – Т. 54, № 2. – С. 90–94.
2. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012003.
3. Патент на изобретение № 2427878. Российская Федерация. Способ и устройство регулирования мощности нагрузки / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев и другие. Опубликовано в Б.И., № 24, 2011.
4. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20, № 2. С. 89–98. DOI: 10.14529/power200208.
5. Алексеева Т. Л. Повышение эффективности рекуперации электрической энергии в электрические сети переменного тока / Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, М. Е. Алексеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 86–97. — DOI: 10.26731/1813- 9108.2019.2(62). 86–97
6. Куцкий 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)
7. Куцкий 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)
8. Куцкий А.П. Снижение несимметрии и несинусоидальности в линиях электропередач, питающих тяговые подстанции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 1. С. 692-696.
9. Черепанов А.В. Тихомиров В.А., Куцкий А.П. Снижение несимметрии и гармонических искажений в районах электроснабжения нетяговых потребителей. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2017. - №3 (55). - С. 145-151.
10. 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.
11. 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.

12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2018615172, 12.03.2018 Имитационная динамическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ// Ушаков В.А., Куцкий А.П., Черепанов А.В.

13. Арсентьев Г.О., Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Куцкий 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. Bانشchikova A.A., Bazilevsky M.P., Tikhomirov V.A. THE Forecasting of pass volume of large containers carried on nontractive rolling stock in the export-import communication in towards from Russian Federation to China [Increase of efficiency of electric energy recovery into AC electrical networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol. 54, No. 2. Pp. 90–94.

2. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. C. 012003.

3. Patent for invention № 2427878. The Russian Federation. Method and device for load power control [Patent na izobretenie № 2427878. Rossijskaja Federacija. Sposob i ustrojstvo regulirovanija moshhnosti nagruzki]. N. L. Ryabchenok, T. L. Alekseeva, L. A. Astrakhantsev et al. Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 2011, № 24

4. Alexeyeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tsepyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy efficiency in electrical circuits with semiconductor devices]. *Vestnik YurGU. Seriya «Energetika»*. [Bulletin of the South Ural State University. Series: “Power engineering”], 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 89–98.

5. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Alekseev M.E. Povyshenie effektivnosti rekuperatsii elektricheskoi energii v elektricheskije seti peremennogo toka [Increase of efficiency of electric energy recovery into AC electrical networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 86–97, DOI: 10.26731/1813- 9108.2019.2(62). 86–97.

6. 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)

7. 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)

8. 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.

9. 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.

10. Cherepanov A.V., Kutsyi A.P. The use of controlled reactive power sources in traction power supply systems. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2016. Vol. 20. No. 9(116). pp. 103-110.

11. 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.

12. 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.

13. 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

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

Конюшкин Дмитрий Александрович – студент группы КТ. 1-23-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru.

Чугуевский Вячеслав Сергеевич – студент группы СОД.1-19-1, 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 .

Konyushkin Dmitry Alexandrovich – student of the КТ. 1-23-1 group, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru .

Vyacheslav Sergeevich Chuguevsky- student of the SOD.1-19-1, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru .