

*А.П. Куцый, Д.А. Конюшкин, И.А. Пахомов*

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

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА РЕЖИМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**Аннотация.** В настоящее время все больше внимания уделяется проблеме использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) для нужд энергоснабжения различных промышленных объектов. На сегодняшний день из-за постоянного роста энергопотребления в крупных промышленных регионах, происходит снижение резерва генерирующих мощностей, а в некоторых случаях растет дефицит генерирующих мощностей. Одним из подходов к повышению энергоэффективности и качества электроэнергии можно рассмотреть использование нетрадиционных возобновляемых источников электроэнергии.

В данной работе рассматривается применение регулируемых и нерегулируемых ветроэнергетических установок для повышения качества напряжения и энергоэффективности в системах электроснабжения железных дорог переменного тока.

**Ключевые слова:** напряжение, генерация, возобновляемая энергетика, системы тягового электроснабжения.

*A.P. Kutsyi, D.A. Konyushkin, I.A. Pakhomov*

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk*

## **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF WIND POWER PLANTS ON THE OPERATION MODE OF THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM**

**Annotation.** Currently, more and more attention is being paid to the problem of using unconventional renewable energy sources (NEE) for the energy supply needs of various industrial facilities. Today, due to the constant growth of energy consumption in large industrial regions, there is a decrease in the reserve of generating capacities, and in some cases, the shortage of generating capacities is growing. One of the approaches to improving energy efficiency and quality of electricity can be considered the use of non-traditional renewable sources of electricity.

This paper examines the use of regulated and unregulated wind power plants to improve voltage quality and energy efficiency in AC railway power supply systems.

**Keywords:** voltage, generation, renewable energy, traction power supply systems.

### **Введение**

Многие развитые страны мира прибегают к использованию НВИЭ в том числе и Россия, разрабатываются программы проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ по использованию НВИЭ. Нетрадиционные формы энергии имеют неограниченный запас, а, следовательно, их использование не приводит к исчерпанию, в отличие от ископаемых топлив [1-4].

Ежегодно проводятся семинары, конференции на которых решается вопрос о предотвращении кризиса в энергетике. Человечество приходит к выводу, что угроза потери традиционных энергоресурсов, таких как газ, нефть, уголь увеличивается, и занялось поисками альтернативных источников энергии. Без преувеличения можно утверждать, что 21 век станет веком интенсивных поисков заменителей углеводородного ископаемого топлива. В свете изложенного, значительно возрос мировой интерес к освоению НВИЭ, прежде всего Солнца, ветра и биотоплива. Эти виды энергии доступны, возобновляемые источники энергии по определению не подвержены истощению, следовательно, способны полностью решить проблему истощения энергетических ресурсов. Возобновляемые источники энергии находятся в среде обитания человека в естественном состоянии, следовательно, их можно использовать, без экологического урона, к таким источникам относятся [5-8]:

–солнечное излучение;

- гидравлическая энергия малых рек;
- геотермальное тепло;
- энергия ветра;
- энергетические ресурсы мирового океана.

При технико-экономическом обосновании строительства СЭС, ВЭС или других нетрадиционных источников наряду со стоимостью сэкономленного топлива большое значение имеет энергетическая эффективность их использования. Она зависит от соотношения установленных мощностей этих электростанций и общей мощности энергосистемы, в которой они работают. Чем меньше это отношение, тем меньшее значение они будут иметь для нее. Так же НВИЭ повышают уровень надежность электроснабжения, так, например, при выводе в ремонт традиционных энергоисточников часть мощности может быть покрыта за счет СЭС и ВЭУ или других альтернативных источников ЭЭ [9-10].

### Моделирование

Методика анализа влияния ветроэнергетических установок (ВЭУ) на качество электроэнергии предприятия железнодорожного транспорта проиллюстрирована на примере тяговых подстанций.

Расчетная схема системы тягового электроснабжения представлена на рисунке 1.

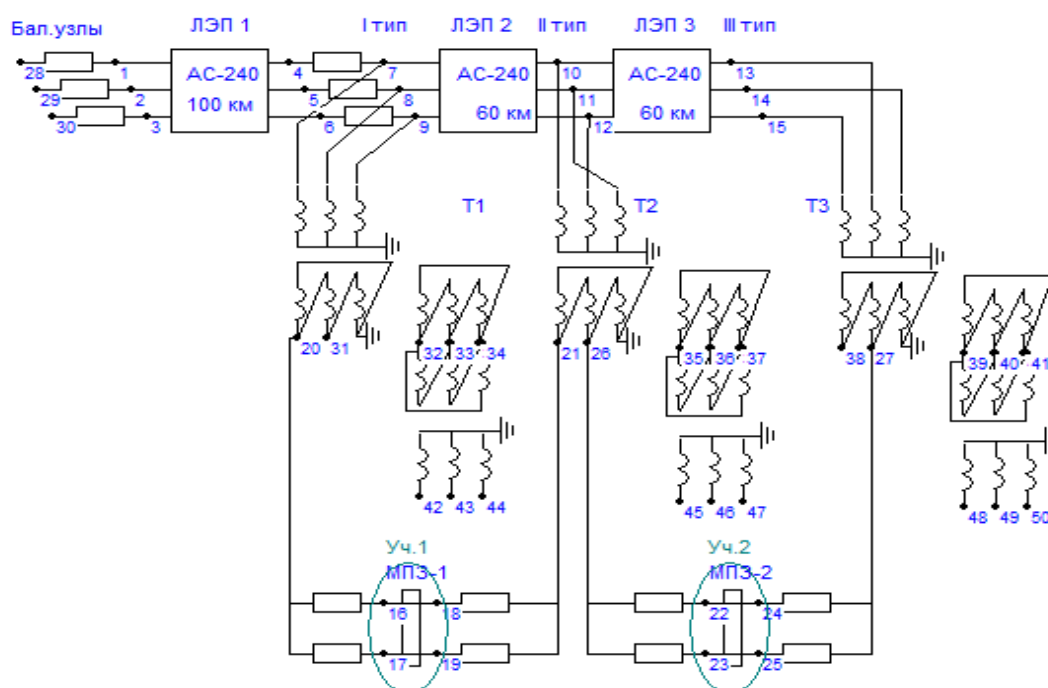


Рисунок 1 – Расчетная схема системы электроснабжения

Таблица 1 – Параметры тяговых трансформаторов подстанций

№	Подстанция	Тип по фазировке	Марка	Параметры трансформатора			
				Сном Вт	Uвн кВ	Uсн кВ	Uнн кВ
1	ТП1	II	ТДТНЖ	40000	230	27,5	6,6
2	ТП2	II	ТДТНЖ	40000	230	27,5	6,6
3	ТП3	III	ТДТНЖ	40000	230	27,5	6,6

Для участка был произведён тяговый расчёт в нечётном направлении. К расчету принят график движения, отвечающий средней реальной поездной ситуации с межпоездными интервалами 30 мин и чередованием поездов массами 5000 т.

Для более наглядного представления результатов ввода в работу ВЭУ далее будут представлены графики напряжений на токоприемнике, потери в ЛЭП и трансформаторах и графики несимметрии напряжений.

В работе рассматривались 3 варианта размещения ВЭУ:

1. Без использования ВЭУ;
2. Размещение нерегулируемых (постоянных) ВЭУ 5 МВат на каждую фазу обмотки 6 кВ тягового трансформатора;
3. Размещение ВЭУ на основе асинхронного генератора.

### Результаты моделирования Варианта 1

Электрическая схема системы тягового электроснабжения представлена на рисунке 2.

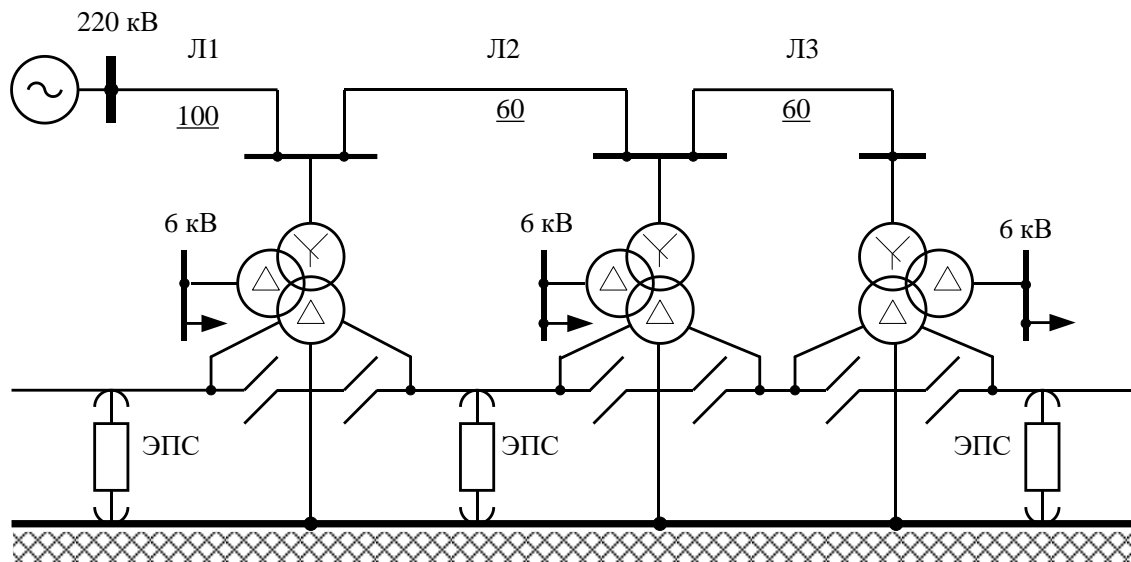


Рисунок 2 – Электрическая схема участка Вариант 1

Напряжение на токоприемнике первого поезда показано на рисунке 3

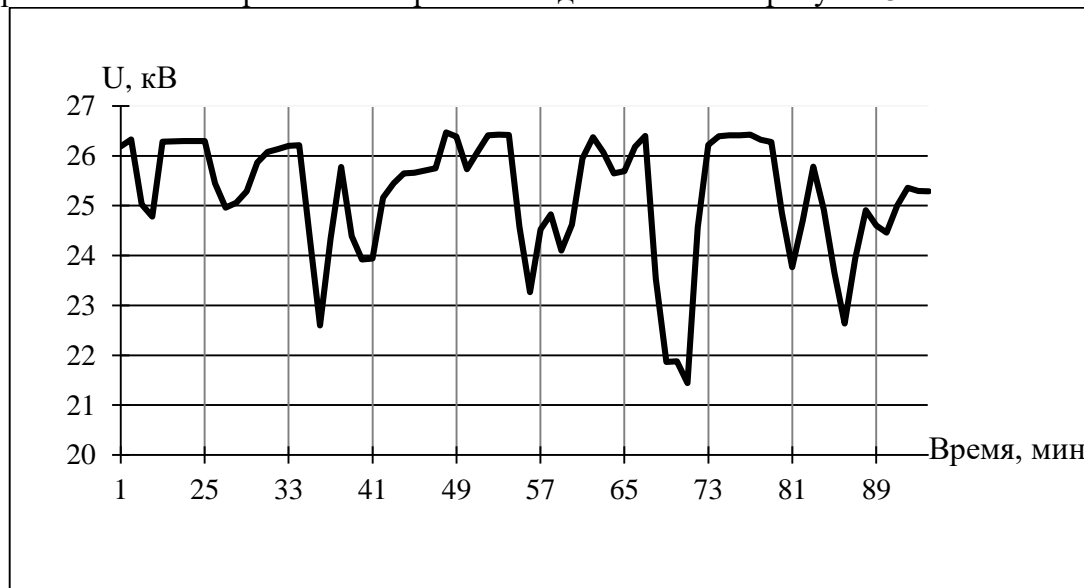


Рисунок 3 – Динамика изменения напряжения на токоприемнике первого поезда

Рассчитаем коэффициент несимметрии напряжения для исходной схемы в программном комплексе Fazonord для всех тяговых подстанций трансформаторных подстанциях (рисунки 4-6).

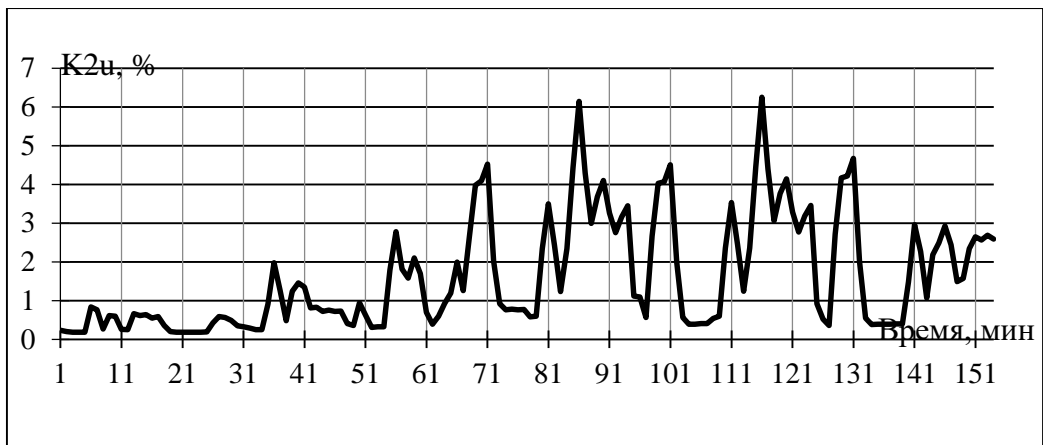


Рисунок 4 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-1

В узлах 32, 33, 34 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 6,25 %;
- минимальное значение  $K_2$  равно 0,18 %;
- время превышения нормально допустимого значения (НДЗ)  $K_{2u}(2\%)$  равно 55 мин.;
- время превышения предельно допустимого значения (ПДЗ)  $K_{2u}(4\%)$  равно 16 мин.

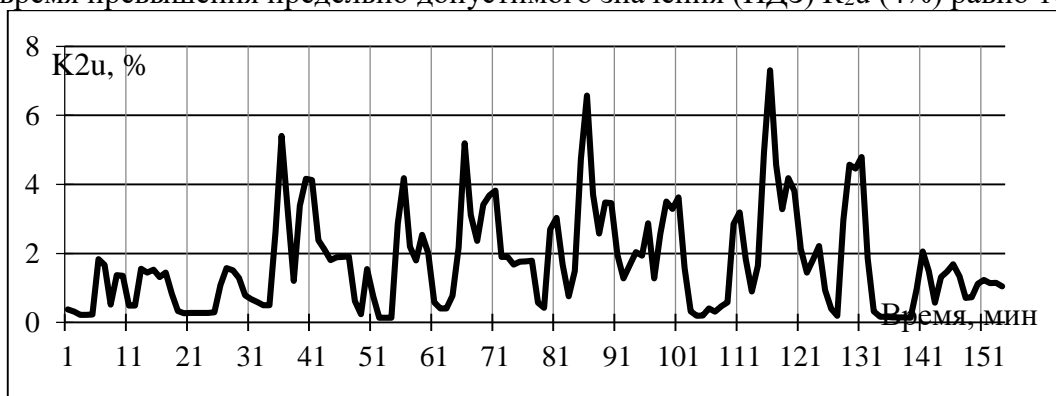


Рисунок 5 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-2

В узлах 35, 36, 37 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 6,21 %;
- минимальное значение  $K_2$  равно 0,12 %;
- время превышения НДЗ  $K_{2u}(2\%)$  равно 56 мин.;
- время превышения ПДЗ  $K_{2u}(4\%)$  равно 15 мин.

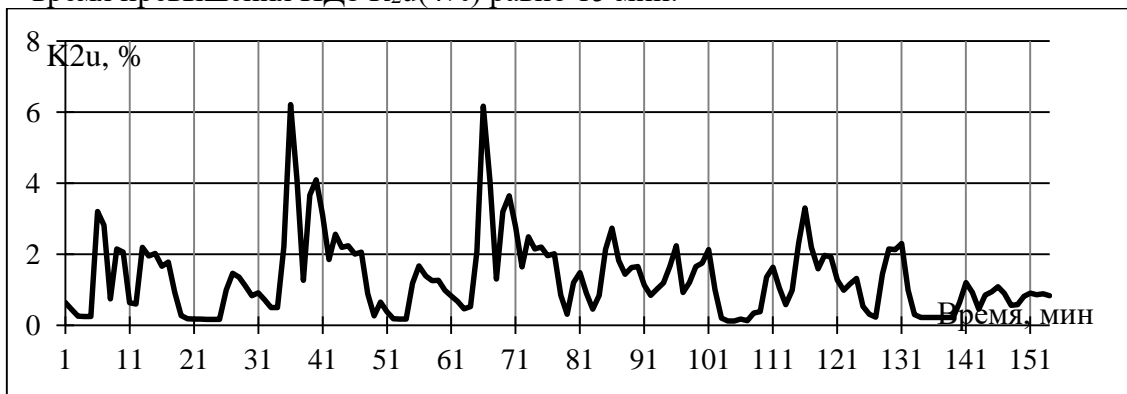


Рисунок 6 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-3

В узлах 39, 40, 41 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 7,31 %;

- минимально значение  $K_2$  равно 1,76 %;
- время превышения НДЗ  $K_2u(2\%)$  равно 49 мин.;
- время превышения ПДЗ  $K_2u(4\%)$  равно 14 мин.

Потери в линиях электропередач (ЛЭП) и трансформаторах показаны на рисунках 7,8.

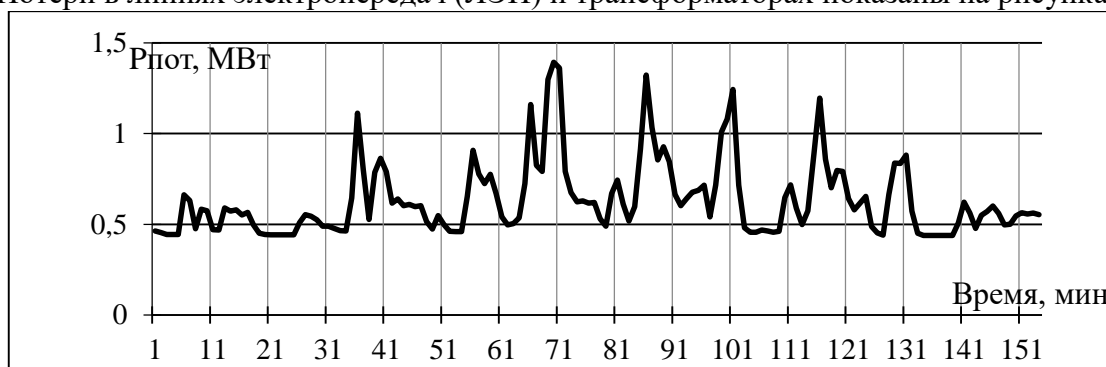


Рисунок 7 – Потери мощности в ЛЭП

Суммарные потери активной энергии – 1627,1 кВтч

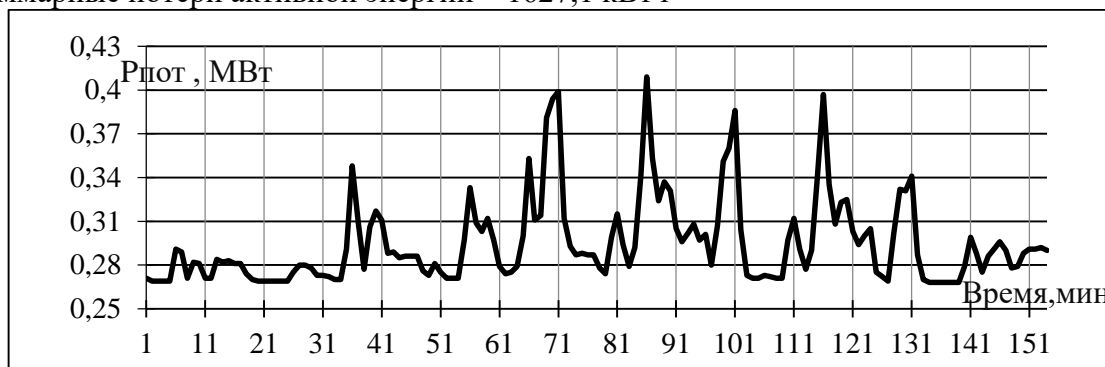


Рисунок 8 – Потери мощности в районных трансформаторах

Суммарные потери активной энергии – 757,4 кВтч

### Результаты моделирования Варианта 2

Электрическая схема участка по Варианту 2 продемонстрирована на рисунке 9

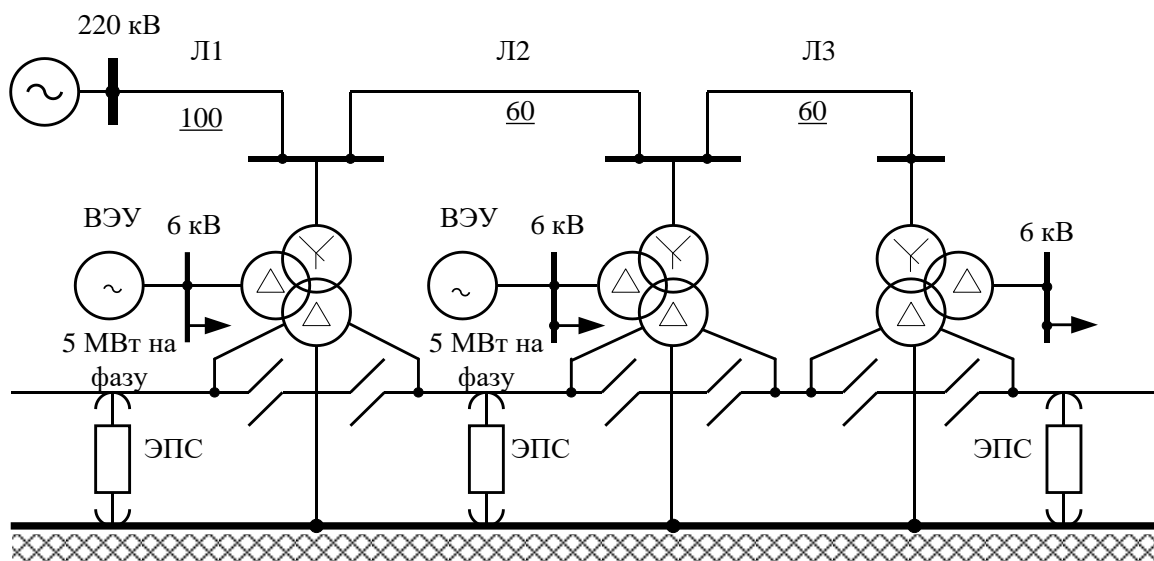


Рисунок 9– Электрическая схема участка с применением ВЭУ

Напряжение на токоприемнике первого поезда показано на рисунке 10

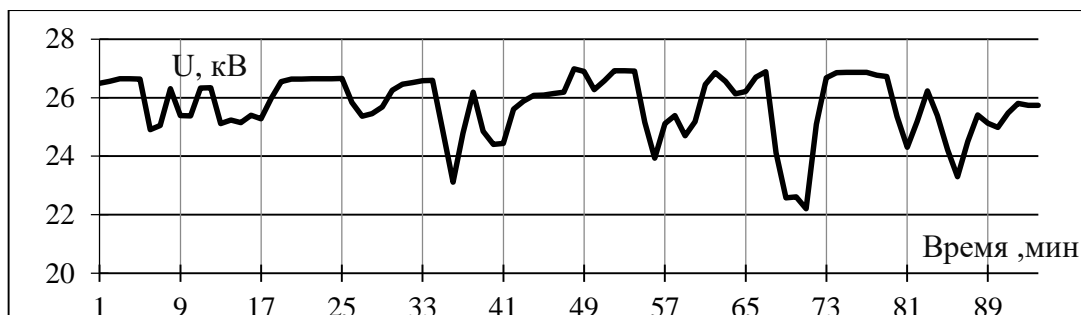


Рисунок 10 – Динамика изменения напряжения на токоприемнике первого поезда

Рассчитаем коэффициент несимметрии напряжения для схемы с нерегулируемым ветрогенератором в программном комплексе Fazonord на 3 трансформаторных подстанциях (рисунки 11-13).

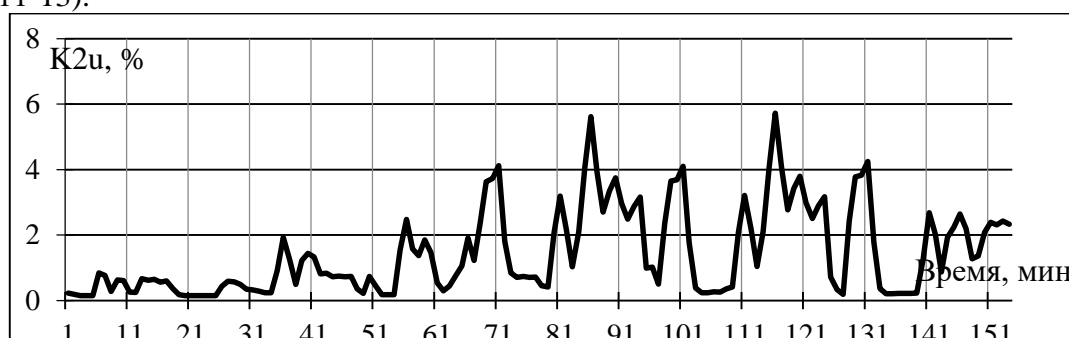


Рисунок 11 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-1

В узлах 32, 33, 34 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 5,72 %;
- минимальное значение  $K_2$  равно 0,15 %;
- время превышения НДЗ  $K_{2u}(2\%)$  равно 51 мин.;
- время превышения ПДЗ  $K_{2u}(4\%)$  равно 8 мин.

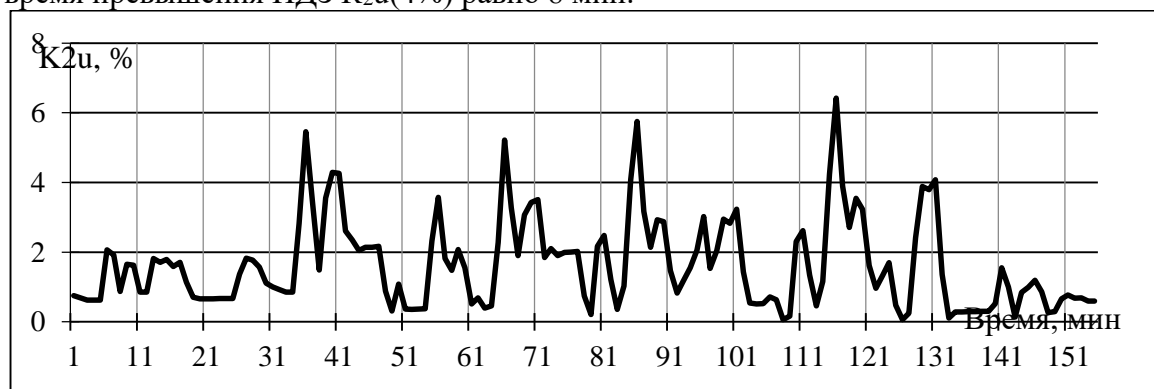


Рисунок 12 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-2

В узлах 35, 36, 37 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 6,42 %;
- минимальное значение  $K_2$  равно 0,06 %;
- время превышения НДЗ  $K_{2u}(2\%)$  равно 50 мин.;
- время превышения ПДЗ  $K_{2u}(4\%)$  равно 9 мин.

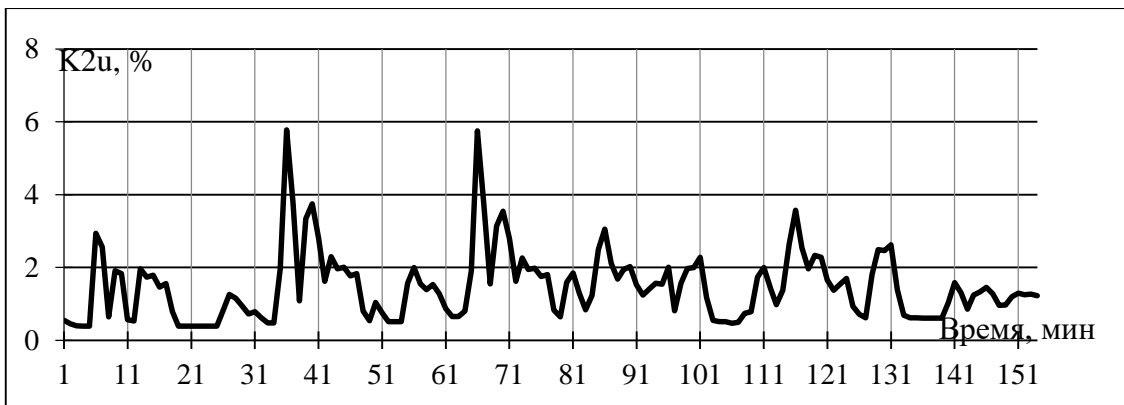


Рисунок 13 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-3

В узлах 39, 40, 41 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 5,78 %;
- минимальное значение  $K_2$  равно 0,39 %;
- время превышения НДЗ  $K_{2u}(2\%)$  равно 30 мин.;
- время превышения ПДЗ  $K_{2u}(4\%)$  равно 2 мин.

Потери в ЛЭП и трансформаторах показаны на рисунках 14,15.

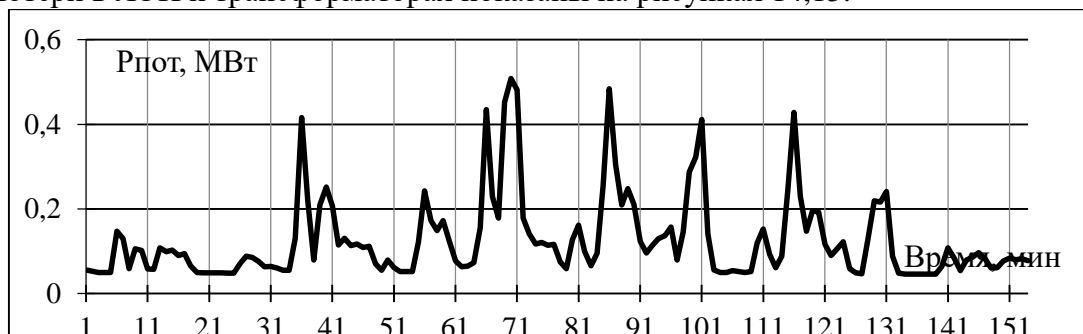


Рисунок 14 – Потери мощности в ЛЭП

Суммарные потери активной энергии – 534,4 кВтч

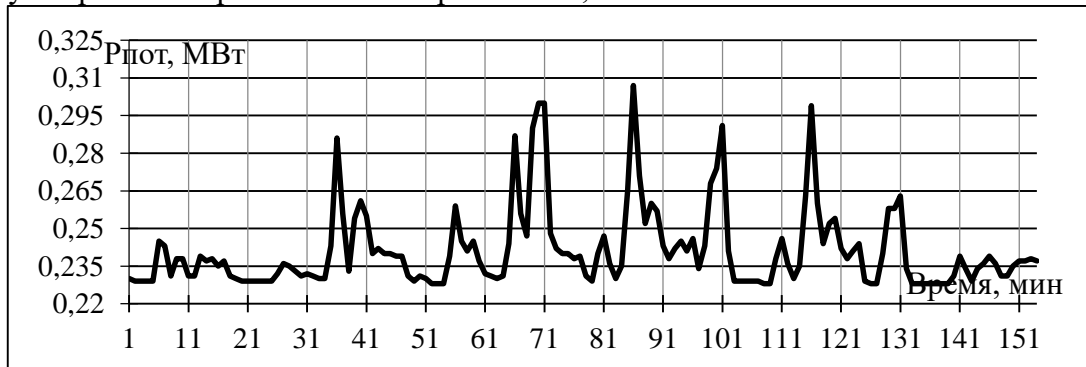


Рисунок 15 – Потери мощности в районных трансформаторах

Суммарные потери активной энергии – 619,1кВтч

### Результаты моделирования Варианта 3

По сравнению со статическими элементами асинхронный двигатель (АД) представляет собою более сложный объект [1,3]. Несимметрия отвечающей двигателю матрицы сопротивлений приводит к затруднениям при моделировании на основе решетчатой схемы с RLC-элементами. Сложности связаны с наличием двух вращающихся магнитных полей (в прямом и в обратном направлениях). При несимметрии питающих напряжений в асинхронном двигателе протекают синусоидальные процессы на трех частотах: на частоте 50 Гц, частоте скольжения  $s$  и на частоте порядка 100 Гц. Электрическая схема представлена на рисунке 16.

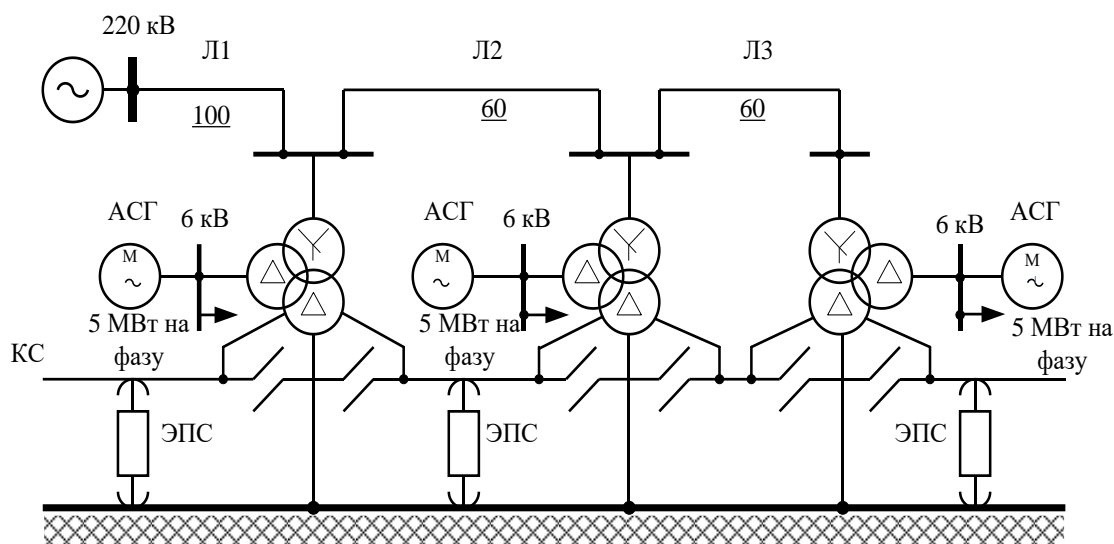


Рисунок 16 – Электрическая схема участка с применением АСГ

Напряжение на токоприемнике первого поезда показано на рисунке 17.

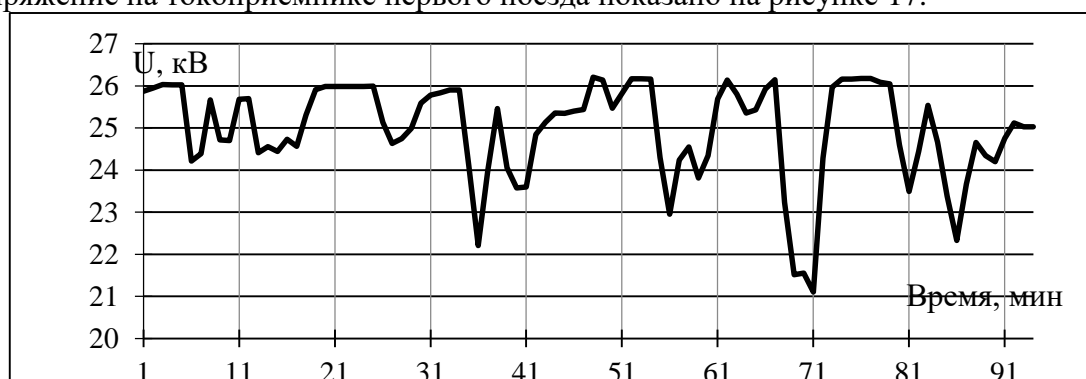


Рисунок 17 – Динамика изменения напряжения на токоприемнике первого поезда

Рассчитаем коэффициент несимметрии напряжения для схемы с асинхронным генератором в программном комплексе Fazonord на 3 трансформаторных подстанциях (рисунки 18-20).

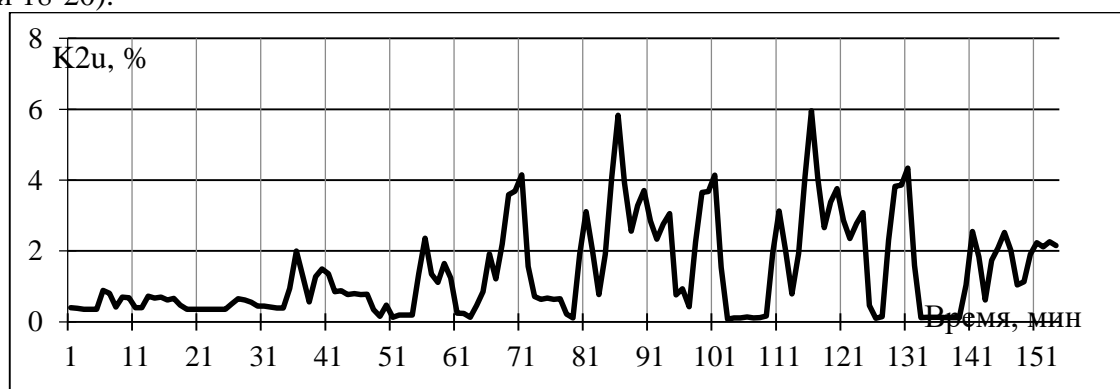


Рисунок 18 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-1

В узлах 32, 33, 34 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 5,96 %;
- минимальное значение  $K_2$  равно 0,08 %;
- время превышения НДЗ  $K_{2u}(2\%)$  равно 46 мин.;
- время превышения ПДЗ  $K_{2u}(4\%)$  равно 8 мин.



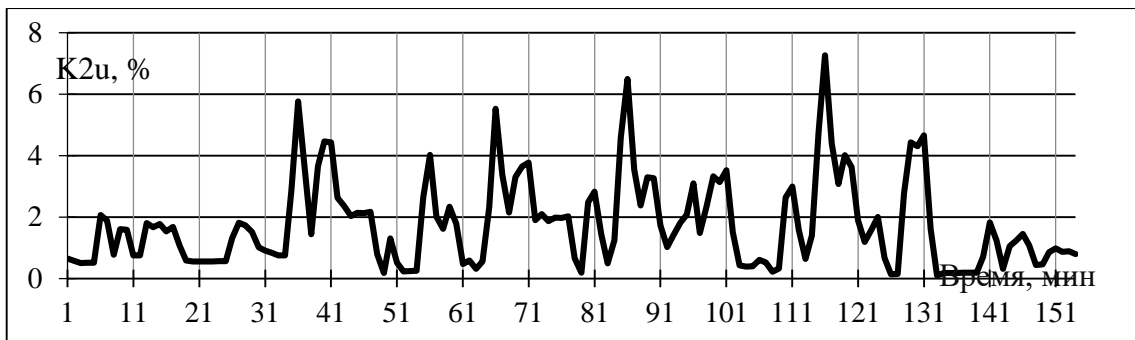


Рисунок 19 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-2

В узлах 35, 36, 37 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 7,27 %;
- минимальное значение  $K_2$  равно 0,1 %;
- время превышения НДЗ  $K_{2u}(2\%)$  равно 53 мин.;
- время превышения ПДЗ  $K_{2u}(4\%)$  равно 14 мин.

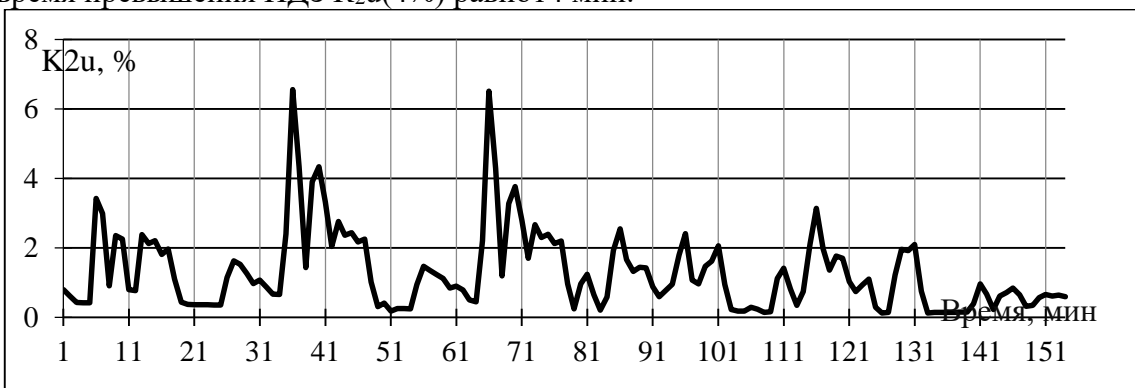


Рисунок 20 – Коэффициент несимметрии напряжения на Т-3

В узлах 39, 40, 41 получены следующие значения:

- максимальное значение  $K_2$  равно 6,56 %;
- минимально значение  $K_2$  равно 0,12 %;
- время превышения НДЗ  $K_{2u}(2\%)$  равно 36 мин.;
- время превышения ПДЗ  $K_{2u}(4\%)$  равно 5 мин.

Потери в ЛЭП и трансформаторах показаны на рисунке 21,22.

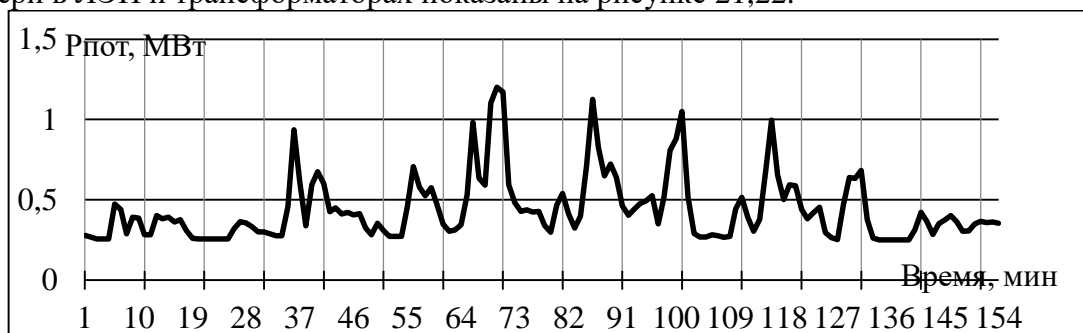


Рисунок 21 – Потери мощности в ЛЭП

Суммарные потери активной энергии – 1131,9 кВтч

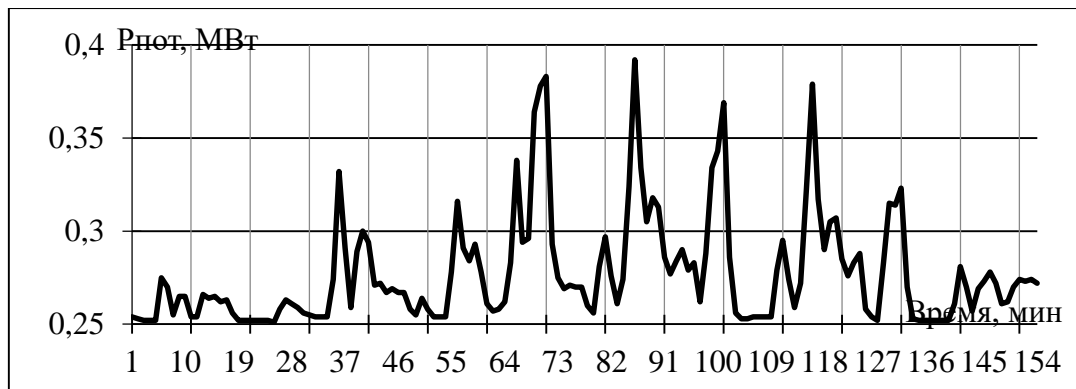


Рисунок 22 – Потери мощности в районных трансформаторах  
Суммарные потери активной энергии – 712,2 кВтч.

### Заключение

Как видно из представленных результатов моделирования, использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии повышает напряжение на токоприемнике, снижает потери в ЛЭП и трансформаторах, хотя проблема качества электроэнергии по коэффициенту несимметрии не решается полностью, так как сохраняется превышение нормально и предельно допустимых значений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог: монография. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – 160 с.
2. Беляков П.Ю., Панов Р.М. Анализ структур и применчемости главных схем электрических соединений современных сетевых ветропарков// Электротехнические комплексы и системы управления, 2009 г. – №4. – с.39-44
3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечетные регуляторы для ветрогенерирующих установок. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 9 с.
4. Власов С.И., Толипов Д.А. Нетрадиционные источники энергии. – Ташкент: Национальный Университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, 2013. – 158 с.
5. Воронин С.М. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Курс лекций. – зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2008. - 230 с.
6. Козин, А. А. Сопряжение ветроэнергетических установок малой мощности в составе ветроэнергетической станции / А. А. Козин // Научный поиск. Технические науки: материалы третьей науч. конф. аспирантов и докторантов / отв. за вып. С. Д. Ваулин ; Юж.-Урал. гос. ун-т.- Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – Т.2 – С.203-206. – Библиогр.: с.206
7. Крюков А.В. Общая энергетика. Часть 2. – Иркутск, ИрИИТ, 2000. - 83 с.
8. Ветрогенераторы удвоенной мощности – [Электронный ресурс] URL: [www.a-vis.info/index.php/ru/stati](http://www.a-vis.info/index.php/ru/stati)
9. Магомедов А.М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии – [Электронный ресурс] URL: [www.bibliotekar.ru/alterEnergy](http://www.bibliotekar.ru/alterEnergy)
10. Ветроэнергетика в возобновляемой энергетике, [Электронный ресурс] URL: <https://www.renwex.ru/ru/ii/vetroehnergetika/>

### REFERENCES

1. Arsentiev M.O., Arsentiev O.V., Kryukov A.V., Chang Zyu Hyung. Distributed generation in railway power supply systems: a monograph. Irkutsk: IrGUPS, 2013. 160 p.
2. Belyakov P.Yu., Panov R.M. Analysis of the structures and applicability of the main circuits of electrical connections of modern grid wind farms// Electrotechnical complexes and control systems, 2009, No. 4, pp.39-44

3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chang Zyu Hyung. Odd regulators for wind turbines. Irkutsk: IrGUPS, 2012. 9 p.
4. Vlasov S.I., Tolipov D.A. Unconventional energy sources. Tashkent: Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, 2013. 158 p.
5. Voronin S.M. Unconventional and renewable energy sources. A course of lectures. – Zernograd: FGOU VPO ACHGAA, 2008. - 230 p.
6. Kozin, A. A. Coupling of low-power wind power plants as part of a wind power plant / A. A. Kozin // Scientific search. Technical sciences: materials of the third scientific conference. postgraduate students and doctoral students / ed. for issue by S. D. Vaulin ; South Ural State University, Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2011. – Vol. 2 – pp.203-206. – Bibliogr.: p.206
7. Kryukov A.V. General energy. Part 2. Irkutsk, IrИТ, 2000. 83 p.
8. Wind turbines of double capacity – [Electronic resource] URL: [www.a-vis.info/index.php/ru/stati](http://www.a-vis.info/index.php/ru/stati)
9. Magomedov A.M. Unconventional renewable energy sources – [Electronic resource] URL: [www.bibliotekar.ru/alterEnergy](http://www.bibliotekar.ru/alterEnergy)
10. Wind power in renewable energy, [Electronic resource] URL: <https://www.renwex.ru/ru/ii/vetroehnergetika/>

### **Информация об авторах**

*Куцый Антон Павлович* – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [kutsyi\\_ap@irgups.ru](mailto: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](mailto:kutsyi_ap@irgups.ru).

*Пахомов Илья Андреевич* – студент группы СОД.3-23-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [kutsyi\\_ap@irgups.ru](mailto: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](mailto: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](mailto:kutsyi_ap@irgups.ru) .

*Ilya Andreevich Pakhomov* - student of the SOD.3-23-1, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [kutsyi\\_ap@irgups.ru](mailto:kutsyi_ap@irgups.ru) .