

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Арсентьев Г.О.

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет сообщения»

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

Предложена модель асинхронного генератора в фазных координатах. Рассмотрены вопросы применения установок распределенной генерации, реализованных на основе асинхронных генераторов, в системах электроснабжения магистральных железных дорог переменного тока. На основе компьютерного моделирования показано, что, кроме снижения затрат на энергообеспечение и повышение надежности электроснабжения на основе установок распределенной генерации с асинхронными генераторами, можно получить ряд дополнительных положительных эффектов, заключающихся в повышении энергоэффективности и улучшении качества электроэнергетики.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, нетрадиционные возобновляемые источники энергии, асинхронные генераторы, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии позволяют потребителям электроэнергии (ЭЭ) использовать собственные генерирующие установки, которые могут конкурировать с централизованным производством электроэнергии [1-3]. Такие установки, объединенные в микроэнергосистемы, являются основой активно внедряемых в настоящее время технологий распределенной генерации (РГ) [3-6]. С помощью РГ могут эффективно решаться экологические проблемы за счет использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ).

Вопросы внедрения технологий РГ на железнодорожном транспорте нашли отражение в нормативных документах, определяющих перспективы развития отрасли, например, в энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на перспективу до 2030 года. В ней, в частности, отмечается, что активное развитие собственной генерации энергии для обеспечения нетяговых потребителей является приоритетным направлением повышения энергоэффективности. Для внедрения технологий РГ в системы электроснабжения железных дорог (СЭЖД) необходима разработка методов и средств моделирования СЭЖД, оснащенных установками РГ. Такие модели могут быть созданы на базе методов моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) в фазных координатах, предложенных в ИрГУПС [7, 8].

Ниже приведены результаты исследований, направленных на разработку методов моделирования СЭЖД с установками РГ, реализованными на основе асинхронных генераторов (АСГ). Для привода АСГ могут использоваться паровые и газовые турбины, а также ветрогенераторы [5, 6]. Проведенный в работе [9] анализ позволил сделать вывод о том, что из всего многообразия НВИЭ для СЭЖД наиболее приемлемыми являются ветрогенераторы и ветропарки с установленной мощностью в несколько МВт. Энергия ветра характеризуется высоким потенциалом и является более привлекательной по экономическим соображениям, чем другие виды НВИЭ.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Модель асинхронного генератора может быть получена на базе модели асинхронного электродвигателя (АЭД), предложенной в работе [7]. Развитие методики моделирования АЭД дано в работе [8]. По сравнению со статическими элементами, такими как ЛЭП и трансформаторы, АЭД представляет более сложный объект. Матрица сопротивлений двигателя является несимметричной, что затрудняет ее использование при моделировании в фазных координатах на основе решетчатых схем замещения. Также возникают затруднения из-за наличия двух магнитных полей, которые вращаются в прямом и обратном направлениях. В несимметричных режимах в АЭД протекают процессы на трех частотах: $f_1 = 50$ Гц, $f_2 = sf_1$ и $f_3 \approx 100$ Гц.

В хорошо изученных симметричных режимах АЭД можно представить однолинейной схемой замещения. Для анализа несимметричных режимов необходимо учитывать параметры двигателя как при малых скольжениях s , так и при $s \approx 2$; при этом целесообразно использовать следующие положения:

- применяется вариант схемы замещения с ветвью намагничивания, вынесенной на первичные зажимы (рис. 1, а); при пуске и скольжении $2-s$, которое отвечает напряжению обратной последовательности, используются другие параметры цепи ротора (рис. 1, б);
- для режимов со скольжением $s \approx 2$ реактивные сопротивления значительно превышают активные;
- определение параметров схем, представленных на рис. 1, осуществляется на основе номинальных значений коэффициента полезного действия η , тока I_H , скольжения s_H и коэффициента мощности $\cos\varphi_H$;
- по величинам напряжений прямой и обратной последовательностей \dot{U}_1, \dot{U}_2 и заданной механической мощности АЭД определяются соответствующие токи; при этом АЭД моделируется тремя источниками тока (рис. 1, в), значения параметров которых корректируются на каждой итерации.

На рис. 1 обозначено: R_μ, X_μ – сопротивления ветви намагничивания; R_1, X_1 – сопротивления статора; $R_2/s, X_2$ – сопротивления ротора при скольжениях, близких к

номинальному; $R_{2P}/(2-s)$, X_{2P} – сопротивления ротора в режиме пуска; s – скольжение, положительное при работе машины в режиме двигателя и отрицательное при работе в режиме генератора.

В работе [8] показана адекватность представленной модели АЭД. Ниже приведены результаты исследований, направленных на выявление возможности ее применения для моделирования асинхронных генераторов (АСГ).

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для подтверждения применимости модели АСГ, представленной на рис. 1, в, проведены сопоставительные расчеты режима простой схемы, показанной на рис. 2. Схема включает источник питания (шины 0,4 кВ подстанции потребителя), низковольтную линию электропередачи и АСГ, параметры которого приведены в табл. 1 и 2. Расчеты симметричных режимов работы АСГ проводились на основе схемы замещения, показанной на рис. 3.

Для расчетов использовались следующие соотношения:

$$\underline{Z}_{ASG} = \frac{\underline{Z}_\mu (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}{\underline{Z}_\mu + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad \underline{Z}_S = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{ASG}, \quad \dot{i} = \frac{U_F}{\underline{Z}_S},$$

$$\dot{U}_{ASG} = U_F - \dot{i} \underline{Z}_S, \quad \dot{S} = 3 \dot{U}_{ASG} \dot{I}^*,$$

$$P = \text{Re} \dot{S}, \quad Q = \text{Im} \dot{S},$$

где \dot{S} , P , Q – полная, активная и реактивная мощности АСГ, $X_k = X_1 + X_2$.

Моделирование на основе модели, представленной на рис. 1, в, проводилось с помощью комплекса программ Fazonord [7] по расчетной схеме, показанной на рис. 2, б. Результаты расчетов и моделирования сведены в табл. 3, 4 и проиллюстрированы на рис. 4.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о хорошем совпадении аналитических расчетов с результатами моделирования в ПК Fazonord; максимальные различия не превышают: по мощностям – 2,5 %, по напряжениям – долей процента; по токам – 1,5 %.

ПРИМЕНЕНИЕ АСГ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Эффекты применения АСГ исследовались путем имитационного моделирования работы СЭЖД, схема которой показана на рис. 5. Параметры асинхронной машины приведены в табл. 5, 6. Перевод машины в режим генератора осуществлялся заданием скорости вращения 3010 об/мин, которая превышала синхронную, равную 3000 об/мин. Асинхронная машина, работающая в режиме генератора, потребляет реактивную мощность. Обеспечение АСГ реактивной мощностью осуществлялось источниками реактивной мощности (ИРМ), подключенными на зажимы АСГ. В качестве ИРМ можно использовать батареи статических конденсаторов, представленные при моделировании емкостными сопротивлениями.

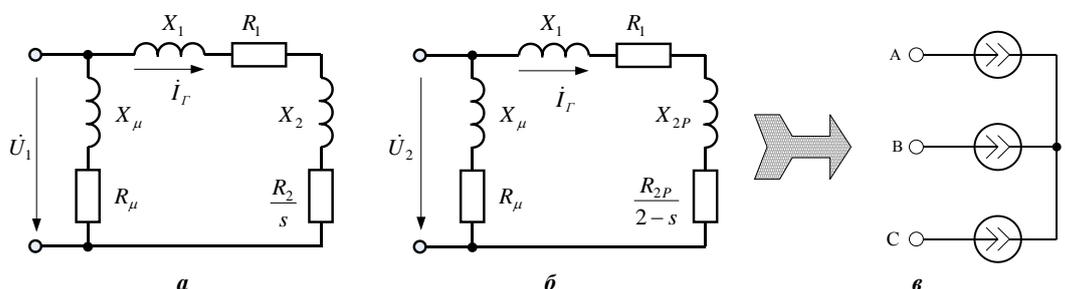


Рис. 1. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) последовательностей и схема модели АЭД в фазных координатах (в)



Рис. 2. Схемы подключения АСГ: а – исходная; б – расчетная схема, реализованная в программном комплексе Fazonord

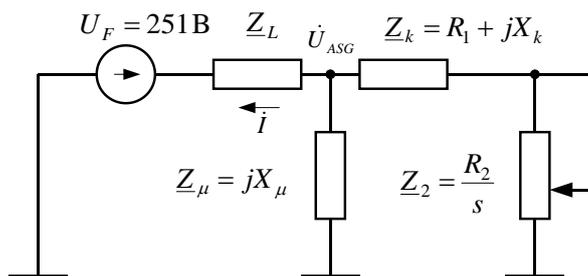


Рис. 3. Схема замещения для аналитических расчетов

Модели СЭЖД включали в свой состав системы внешнего и тягового электроснабжения. Питающая ЭЭС представлена балансирующими узлами с напряжением 230 кВ. Также в состав модели были включены ЛЭП 220 кВ, выполненные проводом АС-240, тяговые подстанции (ТП) с трансформаторами мощностью 40000 кВ·А и две межподстанционные зоны двухпутного участка протяженностями по 50 км с контактной подвеской ПБСМ95+МФ100. Имитационное моделирование проведено с помощью программного комплекса Fazonord [7]. Результаты моделирования сведены в табл. 7, 8 и проиллюстрированы на рис. 6, 7.

Полученные результаты показывают следующее:
 1. Включение АСГ позволяет снизить потоки активной и реактивной мощности в питающей сети и существенно уменьшить потери (см. рис. 5, табл. 7). В расчетном примере средняя величина потерь в питающей ЛЭП 1 снижается при включении АСГ в два раза.
 2. Применение АСГ позволяет заметно уменьшить активную мощность, потребляемую от ЭЭС (см. табл. 7). Использование АСГ в комплексе с ИРМ дает возможность стабилизировать напряжение в тяговой сети и районах электроснабжения нетяговых потребителей.

Паспортные параметры АСГ

Таблица 1

$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, кВт	n_c , об/мин	КПД, %	cosφ	k_m	k_{mp}	k_p
380	90	1500	93	0,91	2,8	1,2	7,2

Примечание. $U_{ном}$ – номинальное напряжение (линейное); $P_{ном}$ – номинальная мощность на валу; n_c – синхронная скорость вращения; k_m – кратность максимального момента; k_{mp} – кратность пускового момента; k_p – кратность пускового тока.

Параметры схем замещения АСГ

Таблица 2

Единица измерения	X_{μ}	R_1	R_2	X_k	R_{2p}	X_{kp}
Ом	6,67	0,06	0,02	0,33	0,03	0,21
Относительные единицы	4,91	0,04	0,01	0,24	0,02	0,15

Примечание. $X_k = X_1 + X_2$; $X_k = X_1 + X_2$; $X_{kp} = X_1 + X_{2p}$.

Мощности, генерируемые АСГ

Таблица 3

n , об/мин	s	Активная мощность, кВт			Реактивная мощность, квар		
		Ф	М	Различие, %	Ф	М	Различие, %
1505	-0,003	-35,3	-35,3	-0,09	30,5	30,5	0,02
1510	-0,007	-70,5	-71,2	-0,95	37,1	37,5	-1,06
1515	-0,010	-104,9	-106,8	-1,76	48,1	49,0	-1,79
1520	-0,013	-137,7	-140,9	-2,32	63,4	64,8	-2,24

Примечание. Символом Ф обозначены результаты, полученные в программном комплексе Fazonord, а символом М – результаты аналитического расчета в Mathcad.

Токи и напряжения АСГ

Таблица 4

n , об/мин	s	Напряжение, В			Ток, А		
		Ф	М	Различие, %	Ф	М	Различие, %
1505	-0,003	251,1	251,1	0,00	61,9	61,9	0,05
1510	-0,007	252,4	252,3	0,04	105,8	106,3	-0,43
1515	-0,010	253,4	253,2	0,08	153,3	154,7	-0,89
1520	-0,013	254,2	253,9	0,12	201,3	203,6	-1,13

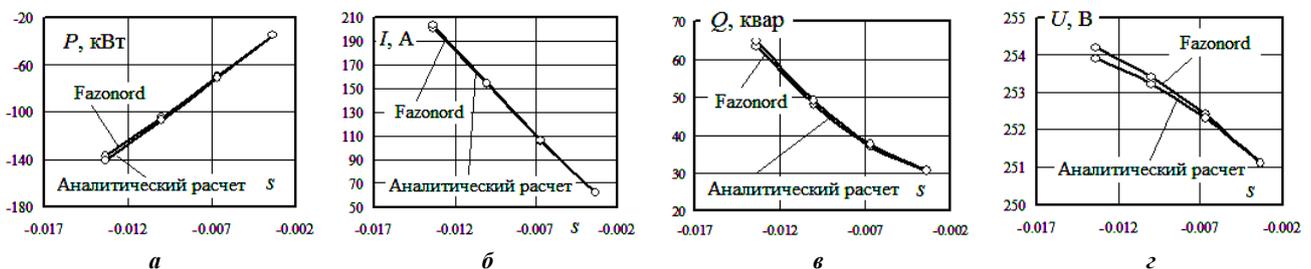


Рис. 4. Результаты расчетов и моделирования:
 а – зависимость активной мощности, генерируемой АСГ, от скольжения;
 б – зависимость фазного тока, посылаемого АСГ в сеть, от скольжения;
 в – зависимость реактивной мощности, генерируемой АСГ, от скольжения;
 г – зависимость напряжений на зажимах АСГ от скольжения

Паспортные параметры АСГ

Таблица 5

$U_{ном}$, кВ	$P_{ном}$, МВт	n_c , об/мин	КПД, %	cosφ	k_{mp}	k_m	k_p
6	6	3000	94,7	0,88	1,2	2,8	7,2

Таблица 6

Параметры схем замещения АСГ

Единица измерения	X_{μ}	R_1	R_2	X_k	R_{2p}	X_{kp}
Ом	19,180	0,173	0,035	1,306	0,121	0,767
Относительные единицы	3,836	0,035	0,007	0,261	0,024	0,153

Таблица 7

Потоки мощности и потери в питающей ЛЭП1, МВт

Параметр	Потери активной мощности ΔP		Поток активной мощности P_{ij}	
	АСГ	Нет АСГ	АСГ	Нет АСГ
Mid	0,090	0,182	14,48	25,00
Max	0,345	0,490	27,02	37,13

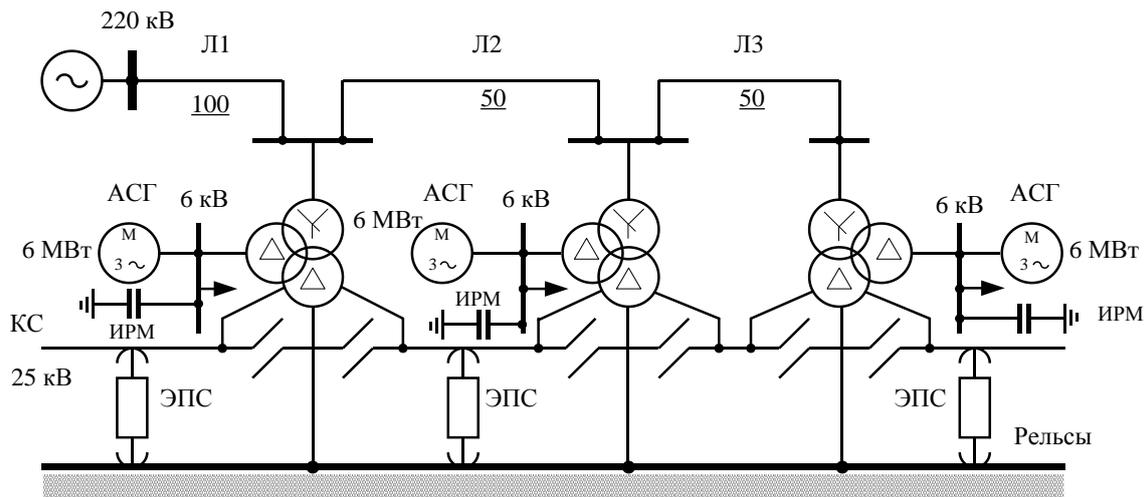


Рис. 5. Схема СЭЖД

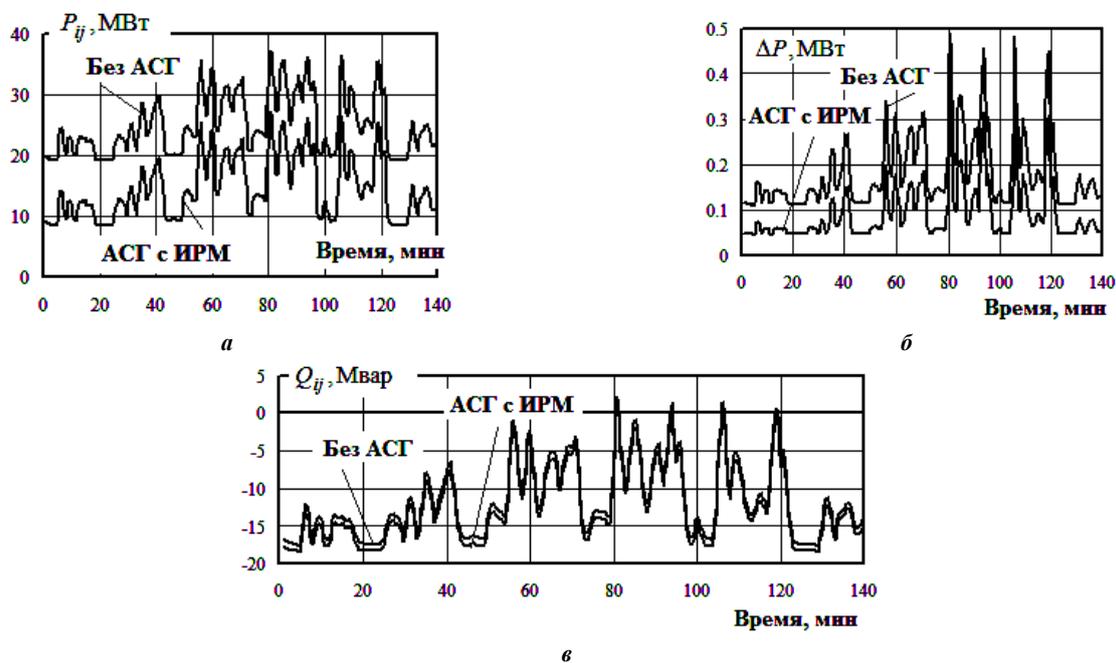


Рис. 6. Потоки мощности и потери в питающей ЛЭП 1:

а – поток активной мощности; б – потери активной мощности; в – поток реактивной мощности

Таблица 8

Генерация АСГ

Параметр	Активная мощность, МВт				Реактивная мощность, Мвар			
	АСГ 1	АСГ 2	АСГ 3	Сумма	АСГ 1	АСГ 2	АСГ 3	Сумма
Min	3,31	3,19	3,30	9,80	-0,14	-0,26	-0,15	-0,56
Mid	3,48	3,44	3,46	10,38	0,01	-0,08	-0,03	-0,09
Max	3,54	3,53	3,53	10,60	0,07	0,01	0,03	0,10

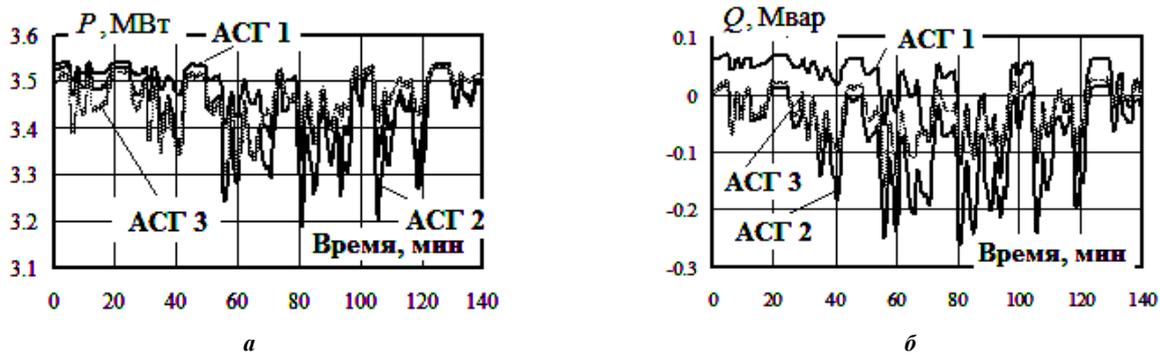


Рис. 7. Генерация активной и реактивной мощности АСГ:

а – генерация активной мощности; б – потребление (генерация) реактивной мощности комплексом АСГ и ИРМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе модели асинхронного двигателя, разработанной в ИрГУПСе, возможно проводить моделирование работы асинхронных генераторов в системах электроснабжения электрифицированных железных дорог.

2. Кроме снижения затрат на энергообеспечение и повышения надежности электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог на основе АСГ можно получить ряд дополнительных положительных эффектов, заключающихся в повышении энергоэффективности и улучшении качества электроэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай Н.И., Стычинский З.А. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 с.
2. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. М.: Физматлит, 2012. 256 с.
3. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог / Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 164 с.
4. Беляков П.Ю., Панов Р.М. Анализ структур и применяе-

5. Беляков П.Ю., Панов Р.М. Анализ эффективности современных цепей преобразования энергии в ветроэлектрических установках большой мощности // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. №4. С.27-34.
6. Суслов К.В., Герасимов Д.О., Шамарова Н.А. Использование динамических характеристик для имитационного моделирования ветрогенератора // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. В 2 т. Т.2. Иркутск: ИРНТУ, 2016. С.252-256.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2011. 170 с.
8. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Математические модели узлов нагрузки электроэнергетических систем, построенные на основе фазных координат. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 176 с.
9. Жуматов А.А. Проблема использования возобновляемых источников энергии для системы тягового электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУПС (МИИТ). 2010. 24 с.

Поступила в редакцию 27 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MODELLING OF ASYNCHRONOUS GENERATORS IN PHASE COORDINATES

Vasily P. Zakaryukin

D.Sc. (Eng.), Professor, Transport Power Industry Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: zakar49@mail.ru.

Andrey V. Kryukov

D.Sc. (Eng.), Professor, Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, Transport Electric Engineering Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Grigoriy O. Arsent'ev

Graduate student, Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

A model of an asynchronous generator in phase coordinates is offered. Issues of application of distributed generation installations realized on the basis of asynchronous generators in railroad power supply systems of alternating current are considered. On the basis of computer modeling it is shown that beside the decrease in costs of power supply and increase of

power supply reliability on the basis of distributed generation installations with asynchronous generators, it is possible to gain a number of the additional positive effects consisting in the increase of energy efficiency and improvement of electric power quality.

Keywords: Railroad power supply systems; nonconventional renewable energy sources; asynchronous generators; modeling.

REFERENCES

1. Voropay N.I., Stychinsky Z.A. *Vozobnovlyаемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика* [Renewable Energy Sources: Theoretical Bases, Technologies, Technical Characteristics, Economy]. Magdeburg, Otto-von-Guericke-universität, 2010. 223 p.
2. Alkhasov A.B. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable power]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 256 p.
3. Arsentyev M.O., Arsentyev O.V., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. *Raspredelennaya generaciya v sistemah elektrosnabzheniya zheleznih dorog* [Distributed Generation in Railroad Power Supply System]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2013. 164 p.
4. Beliakov P.Yu., Panov R.M. Structure and Applicability Analysis of Electric Connections Main Schemes of Modern Network Wind Farms. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electro technical complexes and control systems]. 2009, no.4, pp. 39-44. (in Russian).
5. Belyakov P.Yu., Panov R.M. Efficiency Analysis of Modern Chains of Energy Transformation in Big Power Wind Installations. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electro technical complexes and control systems]. 2011, no.4, pp. 27-34. (in Russian).
6. Suslov K.V., Gerasimov D.O., Shamarova N.A. Use of Dynamic Characteristics for Wind Generator Imitating Modeling. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri* [Increase of production efficiency and use of energy in Siberia conditions]. 2016, vol.2, pp. 252-256. (in Russian).
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznih dorog peremennogo toka* [Methods of Joint Modeling of Railroad Traction and External Power Supply Systems of Alternating Current]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2011. 170 p.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Danh Le Cong. *Matematische modeli uzlov nagruzki elektroenergeticheskikh sistem, postroennye na osnove faznykh koordinat* [Mathematical Models of Node Loading of Electrical Power Systems Constructed on the Basis of Phase Coordinates]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2013. 176 p.
9. Zhumatova A.A. *Problema ispolzovaniya vozobnovlyаемых источников энергии dlya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya*. Kand. Diss. [Problem of Renewable Energy Sources Use for Traction Power Supply System. PhD(Eng.). Diss.]. Moscow, 2010. 24 p.

Информация о других журналах издательства

«Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» – научный рецензируемый журнал, в котором публикуются результаты прогрессивных научных и проектных работ известных ученых, промышленников, молодых ученых России и зарубежья по широкому спектру исследований в области металлургии, машиностроения, металлообработки и в смежных отраслях. Тематика публикаций охватывает весь комплекс актуальных вопросов от разработки полезных ископаемых, получения чугуна, стали и проката до производства продукции с глубокой степенью переработки для различных отраслей экономики. Большое внимание в журнале уделяется современным тенденциям развития сырьевой базы, энергосбережения, автоматизации, экономики и экологии, стандартизации и управления качеством продукции, подготовки и обучения кадров в области металлургии, машиностроения и металлообработки.

Издается с 2003 г.

Журнал с 2007 года включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также в Базы данных ВИНТИ и РИНЦ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

В редакционный совет журнала входят авторитетные ученые из России, Японии, Индии, Италии, Польши, Южно-Африканской Республики, Казахстана.

Электронная версия журнала доступна:

- на информационном портале ФГБОУ ВО «МГТУ» www.magtu.ru (раздел «Журнал Вестник МГТУ»);
- на сайте журнала www.vestnik.magtu.ru;
- на платформе eLIBRARY.