

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.313, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-4-95-100

Влияние нелинейной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации

Ю.Н. Булатов^{1 a}, А.В. Крюков^{2, 3 b}¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия³Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru

Статья поступила 28.09.2016, принята 16.10.2016

Применение установок распределенной генерации (РГ), в том числе на основе возобновляемых энергоресурсов, позволяет стабилизировать напряжение в часы пиковых нагрузок, уменьшать потери в сетях и освобождать пропускные способности связей. В системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) на основе установок РГ возможно улучшить качество электроэнергии, повысить эффективность и надежность электроснабжения. Однако использование установок РГ в СЭЖД требует учета несимметрии и гармонических искажений, вызванных однофазной и нелинейной тяговой нагрузкой. Эти факторы вызывают дополнительный нагрев активных частей генераторов установок РГ, что приводит к необходимости ограничения их мощности. В статье представлены результаты исследований по влиянию нелинейной нагрузки на режим работы турбогенератора малой мощности, оснащенного автоматическими регуляторами возбуждения и частоты вращения. Результаты компьютерного моделирования показывают, что повышение уровня гармонических искажений тока нагрузки может приводить к увеличению токов статора и ротора турбогенератора сверх допустимых значений. При этом повышается амплитуда вынужденных колебаний тока возбуждения генератора с частотой, кратной 300 Гц, что приводит к дополнительным потерям и нагреву. Появление вынужденных колебаний электрических и механических параметров турбогенератора в условиях значительной нелинейной нагрузки может вызвать повышенный износ обмоток и даже выход генераторов из строя. Кроме того, в этих условиях снижается запас устойчивости, ухудшаются демпферные свойства и повышается вероятность перехода турбогенератора в асинхронный режим. Поэтому при внедрении установок РГ в СЭЖД необходимо принимать меры по снижению гармонических составляющих в токе нагрузки, а также учитывать эти обстоятельства при выборе настроек автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог; установки распределенной генерации; генераторы; нелинейная нагрузка; имитационное моделирование.

Influence of nonlinear loads on the operation of turbo generators on distributed generation plants

Yu.N. Bulatov^{1 a}, A.V. Kryukov^{2, 3 b}¹Bratsk State University; 40 Makarenko St., Bratsk, Russia²Irkutsk State Transport University; 15 Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³Irkutsk National Research Technical University; 83 Lermontov St. 83, Irkutsk, Russia^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru

Received 28.09.2016, accepted 16.10.2016

The use of distributed generation plants (DGPs), including those based on renewable energy resources, allows stabilizing the voltage in peak hours, reducing losses in grids and releasing link capacities. In railroad power supply systems (RPSSs) based on DGPs it is possible to improve the quality of electric power, as well as the efficiency and reliability of power supply. However, the use of DGPs in RPSSs requires consideration of asymmetry and harmonic distortion, caused by single-phase loads and nonlinear draft load. These factors lead to additional heating of DGP units, which determines the need to limit power on them. The paper discusses the results of studies on the influence nonlinear loads on the operation of generators, fitted with automatic field and rpm controllers. Computer simulation results show that the increase in harmonic distortion of the load current may lead to an increase of the stator and the rotor currents of the turbo generator beyond acceptable values. This increases the amplitude of forced oscillations of the generator field current with a frequency which is a multiple of 300 Hz, which leads to additional losses and heating. The emergence of forced oscillations of electrical and mechanical parameters of the turbo generator in large nonlinear loads may cause increased wear and even generators winding failure. In addition to these conditions, the reduced margin of stability, damping properties deteriorate and increasing the probability of transition of the turbo generator in asynchronous mode. Therefore, the introduction of DGPs in RPSSs need to take measures to reduce the harmonic components in the load current, as well as to take into account these circumstances when selecting the settings of automatic field and rpm controllers.

Key words: railroad power supply systems; distributed generation plants; generators; nonlinear load; simulation modeling.

Введение

Переход электроэнергетики РФ на новую технологическую платформу интеллектуальных сетей (Smart Grid) предполагает применение установок распределенной генерации (РГ), в том числе на основе возобновляемых энергоресурсов [1–3]. Концепция Smart Grid применима в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) и позволяет снизить финансовые затраты на энергообеспечение объектов инфраструктуры железных дорог, повысить надежность электроснабжения и улучшить качество электроэнергии в районах электроснабжения нетяговых потребителей [4–11]. Однако особенности режимов работы СЭЖД, связанные с резко переменным характером однофазных тяговых нагрузок, наличием несимметрии и гармонических искажений [12], усложняют условия работы синхронных генераторов (СГ) установок РГ. Возникает необходимость ограничения величины отдаваемой ими мощности, что требует количественного определения влияния несимметричной и нелинейной нагрузки на режимы работы генераторов. Ранее выполненные исследования по этой тематике [13; 14] позволили значительно расширить внедрение в практику эксплуатации асинхронных и несимметричных режимов работы мощных генераторов. Методы оценки влияния несимметрии нагрузки с несинусоидальной формой кривой тока были основаны на том, что действие обратносинхронного поля составляющей обратной последовательности и полей высших гармонических тока статора приводят к одному и тому же эффекту — дополнительному нагреву активных частей генератора [15].

Появление высших гармоник напряжения и тока в обмотках статора и ротора генератора приводит к снижению коэффициента мощности, что может вызвать увеличение величины тока возбуждения в результате действия автоматического регулятора возбуждения (АРВ). В работе [15] приводятся зависимости превышения температуры обмотки ротора, обусловленного некоторым эквивалентным током возбуждения турбогенератора, от допустимой продолжительности работы в условиях несимметрии и несинусоидальности. Графики, иллюстрирующие эти зависимости, приведены на рис. 1.

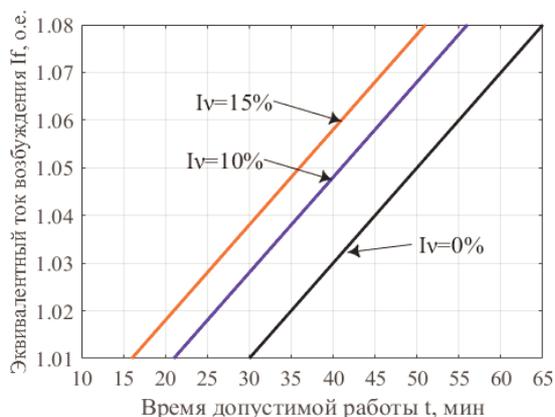


Рис. 1. Зависимость эквивалентного тока возбуждения от допустимой продолжительности работы турбогенератора мощностью 25 МВт: I_v — среднееквадратичное значение высших гармонических составляющих

Как видно (рис. 1), при увеличении содержания высших гармонических составляющих тока возрастает температура обмотки ротора, что снижает допустимую продолжительность работы турбогенератора. Следует также отметить, что по величине эквивалентного тока возбуждения возможно контролировать режим работы турбогенератора на тяговую нагрузку и определять допустимую продолжительность эксплуатации при возникновении значительной несимметрии и несинусоидальности.

За последнее время произошли изменения в электроэнергетических системах (ЭЭС) и СЭЖД. Увеличилось количество применяемой силовой полупроводниковой техники и других нелинейных элементов. Особо значительный прогресс за последние годы достигнут в части создания эффективных средств автоматического регулирования возбуждения и частоты вращения (АРЧВ) ротора СГ. Все это делает актуальной задачу исследования влияния несимметрии и несинусоидальности на работу СГ малой мощности. В статье представлены результаты исследований влияния нелинейной нагрузки на режим работы турбогенератора малой мощности, оснащенного АРВ и АРЧВ.

Описание имитационной модели и результатов исследования. Схема исследуемой имитационной модели, реализованной с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems системы MATLAB, представлена на рис. 2. Турбогенератор установки РГ моделируется стандартным блоком высоковольтной синхронной машины (Synchronous Machine pu Fundamental) номинальной мощностью 3,125 МВ·А и напряжением 6,3 кВ и паровой турбиной (Steam turbine), математическая модель которой характеризуется следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{P_T}{\mu} = \frac{1}{T_T s + 1},$$

где P_T — мощность турбины; μ — открытие регулирующего органа; T_T — постоянная времени турбины, определяемая запаздыванием в преобразовании энергии пара в механическую энергию (в среднем T_T составляет 0,2 с); s — оператор Лапласа.

Модель тиристорной системы возбуждения (Excitation System) сформирована на основе уравнений, описывающих тиристорный преобразователь и входной усилитель [16]. Для последнего можно принять допущение о линейной характеристике с коэффициентом усиления k_a и постоянной времени T_a при моделировании его аperiodическим звеном первого порядка. Тиристорный возбудитель также моделируется аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом k_e , постоянной времени T_e и блоком ограничения напряжения. При моделировании принимались следующие числовые значения параметров системы возбуждения: $k_a = 1$; $T_a = 0,001$ с; $k_e = 1$; $T_e = 0,025$ с.

Для регулирования частоты и напряжения генератора использовались модели микропроцессорного АРВ (MARE) и АРЧВ (Automatic regulator of rotor speed), описание которых приведено в [10; 17; 18]. Согласование настроек АРВ и АРЧВ генераторов установки РГ осуществлялось с помощью программного комплекса «Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций» [10; 17; 19; 20].

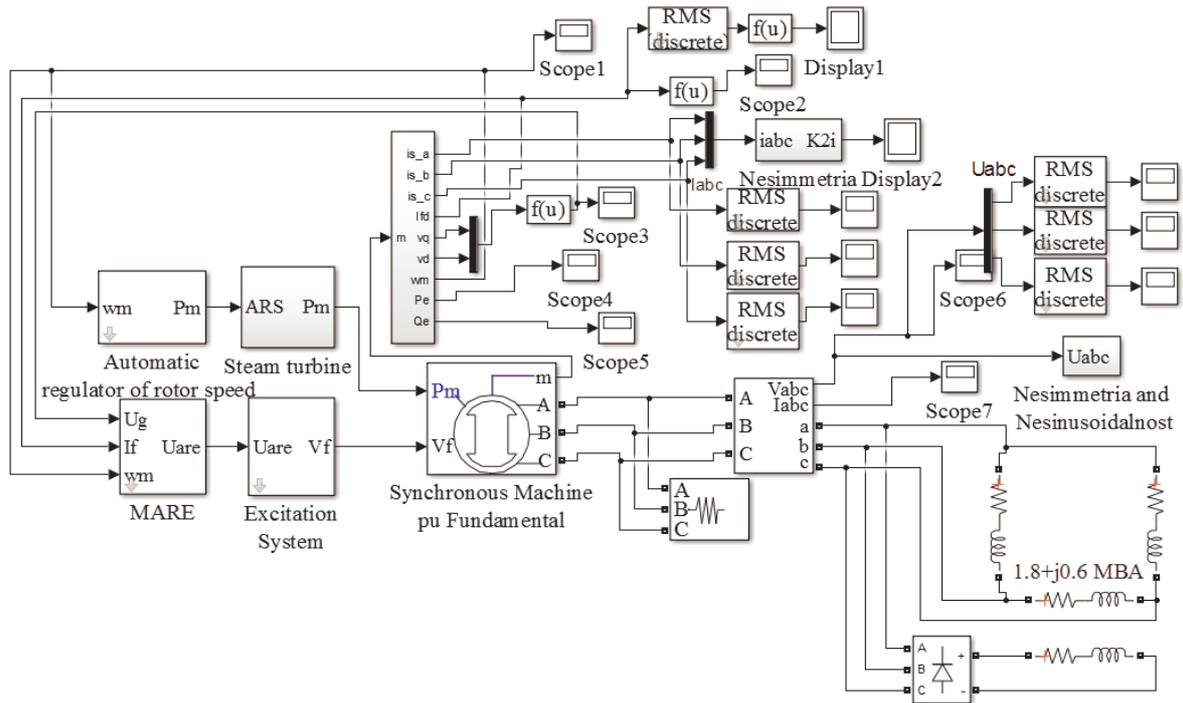


Рис. 2. Схема модели турбогенератора, работающего на симметричную и нелинейную нагрузку в MATLAB

Измерения среднеквадратичных значений тока и напряжения генератора, а также коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию, выполнялись с помощью стандартных блоков пакета SymPowerSystems системы MATLAB: RMS (Root mean square level), Total Harmonic Distortion и 3-phase Sequence Analyzer.

Турбогенератор в модели работал на активно-индуктивную нагрузку мощностью $1,8 + j 0,6 \text{ MB}\cdot\text{A}$.

Искажение синусоидальности кривой тока и напряжения в системе осуществлялось последовательным увеличением мощности выпрямителя с одновременным снижением основной нагрузки турбогенератора так, чтобы суммарная нагрузка оставалась неизменной. Результаты компьютерного моделирования, соответствующие с данными, полученными в [15], сведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 3, 4.

Таблица 1

Экспериментальные данные при работе модели турбогенератора в MATLAB на несинусоидальную нагрузку

Параметр	Обозначение	Величина													
		0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	
Коэффициент несимметрии тока статора по обратной последовательности, %	k_{2I}	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	
Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, %	k_{2U}	0	0,002	0,006	0,007	0,008	0,006	0,009	0,009	0,013	0,019	0,021	0,017	0,022	
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %	k_{Ua}	0,001	0,741	1,821	2,733	3,503	4,250	4,948	6,794	8,5	10,15	11,67	15,6	19,77	
	k_{Ub}	0,001	0,746	1,842	2,738	3,528	4,260	4,915	6,819	8,53	10,16	11,63	15,58	19,8	
	k_{Uc}	0,001	0,727	1,847	2,710	3,534	4,234	4,942	6,827	8,537	10,12	11,66	15,9	19,8	
Ток возбуждения, о.е.	$I_f^{(mid)}$	0,787	0,791	0,795	0,801	0,807	0,812	0,818	0,837	0,855	0,874	0,891	0,945	1,003	
	$I_f^{(max)}$	0,787	0,792	0,799	0,807	0,814	0,822	0,83	0,853	0,876	0,898	0,921	0,982	1,0491	
	I_{mf}	0	0,001	0,004	0,006	0,008	0,011	0,013	0,019	0,025	0,03	0,035	0,048	0,06	
Ток статора (действующее значение), о.е.	I_A	0,430	0,432	0,438	0,443	0,449	0,454	0,46	0,477	0,493	0,509	0,525	0,569	0,613	
	I_B	0,430	0,432	0,438	0,443	0,449	0,454	0,46	0,477	0,493	0,509	0,525	0,569	0,613	
	I_C	0,430	0,432	0,438	0,443	0,449	0,454	0,46	0,477	0,493	0,509	0,525	0,569	0,613	

Примечание. I_{mf} , о.е. — амплитуда вынужденных колебаний частотой 300 Гц.

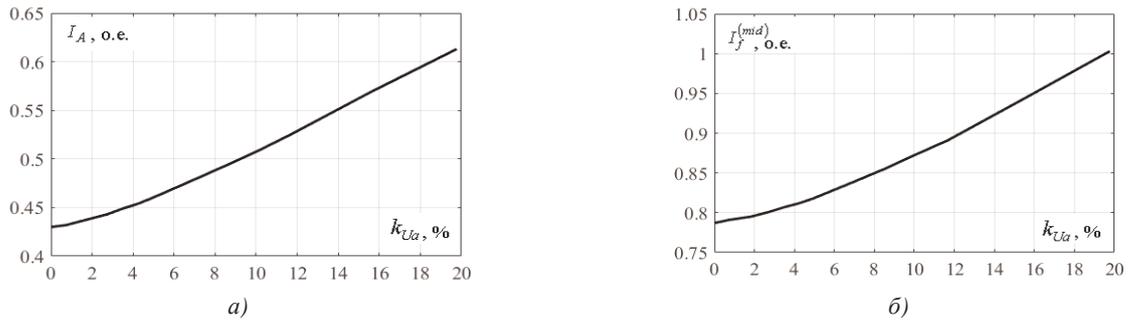


Рис. 3. Зависимость тока статора (а) и ротора (б) генератора от искажения синусоидальности кривой напряжения

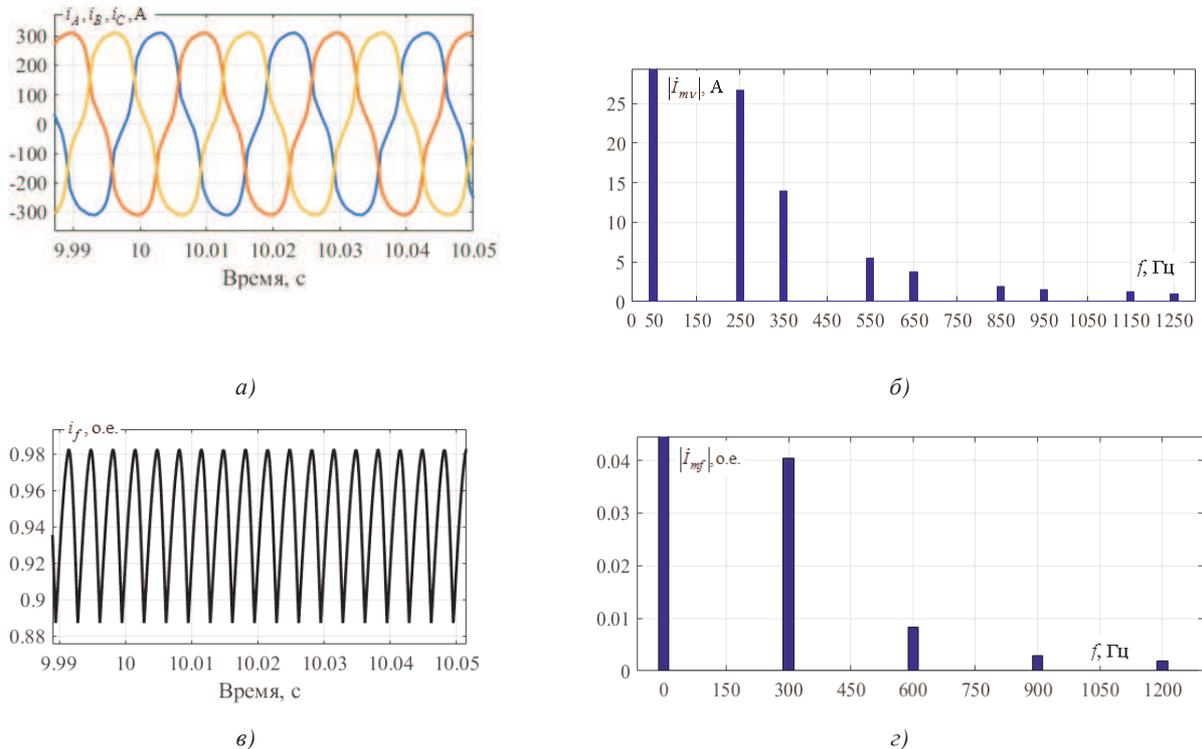


Рис. 4. Осциллограммы токов статора (а) и ротора (в) генератора и их гармонический состав (б, г) при $k_{Ua} = 15,6\%$

Необходимо отметить, что основное влияние увеличения уровня гармонических составляющих тока нагрузки приводит к повышению тока статора и ротора турбогенератора (рис. 3) с сохранением симметричного режима работы.

Результаты исследования также показывают, что при увеличении несинусоидальности кривой напряжения и тока повышается амплитуда вынужденных колебаний тока возбуждения генератора частотой, кратной 300 Гц, что приводит к дополнительным потерям и нагреву (рис. 4 в, г).

Таким образом, увеличение мощности гармонических составляющих тока нагрузки сопровождается увеличением токов статора и ротора и появлением вынужденных колебаний электрических и механических параметров турбогенератора, что необходимо учитывать при внедрении установок РГ в СЭЖД. Неучет этих факторов может привести к быстрому износу оборудования и даже выходу генераторов из строя. Кроме того,

в условиях значительной несинусоидальности снижается запас устойчивости и повышается вероятность перехода турбогенератора в асинхронный режим. Эксперименты на имитационной модели показывают, что при работе турбогенератора на выпрямительную нагрузку, мощность которой составляет 85 % номинальной мощности генератора, и подключении дополнительной нагрузки система теряет устойчивость, а генератор переходит в асинхронный режим. В отличие от этого при работе турбогенератора на линейную нагрузку той же мощности АРВ и АРЧВ качественно демпфируют вносимые в систему возмущения. Осциллограммы частоты вращения ротора турбогенератора, иллюстрирующие данные выводы, представлены на рис. 5. Необходимо отметить, что в данном эксперименте коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения достигал $k_U = 30\%$. При этом среднеквадратичное значение тока возбуждения турбогенератора увеличилось на 55 % по сравнению с режимом

работы турбогенератора на линейную нагрузку. Эти обстоятельства, имеющие место и в реальных условиях работы СЭЖД, необходимо также учитывать при поиске настроек АРВ и АРЧВ генераторов установок РГ.

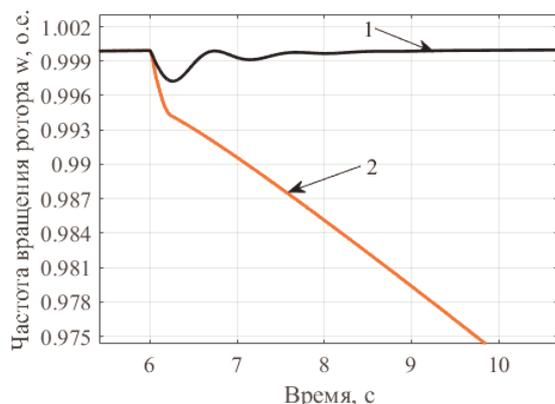


Рис. 5. Оциллограммы изменения частоты вращения ротора турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки: 1 — линейная нагрузка; 2 — нелинейная нагрузка (нагрузка в обоих режимах составляла 85 % номинальной мощности турбогенератора)

Заключение

На основании компьютерного моделирования выявлено, что при увеличении мощности гармонических составляющих тока нагрузки имеют место следующие эффекты:

1. Значительно повышаются токи статора и ротора турбогенератора. Например, при $k_{Ua} = 15,6$ % средне-квадратичное значение тока статора увеличилось на 32 % по сравнению с режимом, когда выпрямительная нагрузка отсутствовала. При $k_{Ua} = 3,5$ % среднее значение тока возбуждения увеличилось на 2,5 % по сравнению с режимом, когда выпрямительная нагрузка отсутствовала, а при $k_{Ua} = 15,6$ % (выпрямительная нагрузка составляла 25 % номинальной мощности генератора) — на 20 %. Это обстоятельство связано с неправильной работой АРВ в таких условиях, что требует применения в АРВ фильтров гармоник и ограничения тока возбуждения.

2. Повышается амплитуда вынужденных колебаний тока возбуждения генератора частотой, кратной 300 Гц. Например, при $k_{Ua} = 15,6$ % амплитуда вынужденных колебаний составила 5 % полезного сигнала. Это приводит к дополнительным потерям и нагреву.

3. Возникают дополнительные механические колебания ротора генератора частотой 300 Гц. С увеличением несинусоидальности также увеличивается амплитуда этих колебаний, что может привести к режиму биения, быстрому износу генератора и потере устойчивости.

Литература

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / под ред. В.Е. Фортова, А.А. Макарова. М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012. 235 с.
2. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.
3. Magdi S. Mahmoud, Fouad M. AL-Sunni Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015. 578 p.
4. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Применение технологий распределенной генерации для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Вестн. ИрГТУ. 2009. № 1 (37). С. 190-195.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ушаков В.А., Алексеенко В.А. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 129 с.
6. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Влияние установок распределенной генерации на качество электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 4 (36). С.162-167.
7. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Анализ симметрирующего эффекта распределенной генерации // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 2. С. 75-81.
8. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог. 2013. 160 с.
9. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. С. 60-69.
10. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.
11. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение сетевых кластеров (microgrid) в системах электроснабжения железных дорог. Братск: БрГУ, 2016. 178 с.
12. Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965. 464 с.
13. Тер-Газарян Г.Н. Экспериментальное исследование несимметричного режима гидрогенераторов // Электричество. 1950. № 8. С. 8-13.
14. Тер-Газарян Г.Н. Активное сопротивление контуров ротора и статора явнополюсной синхронной машины токам высших гармоник // Электричество. 1962. № 11. С. 10-13.
15. Барковский Б.С., Еремин Н.Е., Шалимов М.Г. Влияние несимметрии и несинусоидальности нагрузки на работу трансформаторов и турбогенераторов // Научные труды. Омск, 1964. Т. 53. С. 98.
16. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. Second Edition. IEEE Press, 2003. 688 p.
17. Игнатъев И.В., Булатов Ю.Н. Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов на основе экспериментальных данных: моногр. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 278 с.
18. Булатов Ю.Н., Попик В.А. Разработка модели микропроцессорного автоматического регулятора возбуждения в среде MATLAB и оптимизация его настроек // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 2. С. 3-8.

19. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Программный комплекс для идентификации электроэнергетических систем и оптимизации коэффициентов стабилизации автоматических регуляторов возбуждения // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 4 (8). С. 106-113.

20. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение алгоритмов согласованной настройки регуляторов турбогенераторов установки распределённой генерации // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 130-139.

References

1. The concept of intellectual power system of Russia with actively adaptive network / pod red. V.E. Fortova, A.A. Makarova. M.: ОАО «NTTs FSK EES», 2012. 235 p.

2. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.

3. Magdi S. Mahmoud, Fouad M. AL-Sunni Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015. 578 p.

4. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsent'ev M.O. The use of distributed generation technologies for electricity consumers not traction railway // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2009. № 1 (37). P. 190-195.

5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ushakov V.A., Alekseenko V.A. Operational management in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2012. 129 p.

6. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Influence of installations of the distributed generation on quality of the electric power in systems of power supply of the railroads // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. № 4 (36). P. 162-167.

7. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The analysis of the symmetrizing effect of the distributed generation // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2012. Т. 2. P. 75-81.

8. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The distributed generation in systems of power supply of the railroads. 2013. 160 p.

9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Fuzzy regulators for the wind generator of installations // Proceedings of

the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 2014. № 7-8. P. 60-69.

10. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Network clusters in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2015. 205 p.

11. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Network clusters (microgrid) in systems of power supply of the railroads. Bratsk: BrGU, 2016. 178 p.

12. Markvardt K.G. The energy supply for electric railways. M.: Transport, 1965. 464 p.

13. Ter-Gazaryan G.N. Experimental study of asymmetric mode hydrogenerators // Elektrichestvo. 1950. № 8. P. 8-13.

14. Ter-Gazaryan G.N. Active resistance of the rotor circuit and the stator salient-pole synchronous machine currents harmonics // Elektrichestvo. 1962. № 11. P. 10-13.

15. Barkovskii B.S., Eremin N.E., Shalimov M.G. Influence of unbalanced and non-sinusoidal load on the operation of transformers and turbine generators // Nauchnye trudy. Omsk, 1964. Т. 53. P. 98.

16. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. Second Edition. IEEE Press, 2003. 688 p.

17. Ignat'ev I.V., Bulatov Yu.N. Models and methods of setting generator excitation control systems on the basis of experimental data: monogr. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2016. 278 p.

18. Bulatov Yu.N., Popik V.A. Development of a model microprocessor automatic excitation regulator in MATLAB and optimization settings // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2011. Т. 2. P. 3-8.

19. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Software system for identification of power systems and optimization of the coefficients of the stabilization automatic excitation controller // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2010. № 4 (8). P. 106-113.

20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Application of algorithms for coordinated tuning of controllers of turbine generators the installation of distributed generation // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2014. Т. 2. P. 130-139.