

УДК 656.2/.4

Воронина Е.В., Куцкий А.П.

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Система электроснабжения железных дорог характерна наличием резкопеременных однофазных нагрузок, высокой динамичностью потребления и возникновением нестереотипных ситуаций. Возникает необходимость в разработке гибких моделей управления режимами работы системы для поддержания допустимых значений показателей качества электрической энергии и повышения энергоэффективности. Адекватным решением существующих проблем является использование активных оптимизирующих устройств, относящихся к системе FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System). В данной работе показана эффективность применения активного кондиционера гармоник, статического тиристорного компенсатора и управляемого шунтирующего реактора на изменение показателей качества электрической энергии в системе внешнего электроснабжения и тяговой сети.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, несимметрия напряжения, высшие гармоники, несинусоидальность, качество электрической энергии, FACTS.

Voronina E.V., Kutsyi A.P.

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRIC ENERGY IN RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEMS

Annotation. The railway power supply system is characterized by the presence of sharply alternating single-phase loads, high dynamic consumption and the occurrence of non-stereotypical situations. There is a need to develop flexible models for managing the operating modes of the system to maintain acceptable values of electric energy quality indicators and improve energy efficiency. An adequate solution to the existing problems is the use of active optimizing devices related to the FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) system. This paper shows the effectiveness of using an active harmonic conditioner, a static thyristor compensator and a controlled shunt reactor to change the quality indicators of electric energy in the external power supply system and the traction network.

Keywords: railway power supply systems, voltage asymmetry, higher harmonics, non-sinusoidality, quality of electric energy, FACTS.

Постановка проблемы. Электрическая энергия, как и любой другой ресурс, требуемый для выполнения работы техническими установками, имеет свои показатели качества. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения определены в соответствии с ГОСТ 32144-2013. Одними из таких показателей являются продолжительные изменения характеристик напряжения, такие как несинусоидальность, несимметрия и отклонение напряжения.

Электроподвижной состав является крупным источником возникновения несинусоидальности [1,2,3] напряжения, в следствии наличия мощных выпрямительных установок. В процессе работы ЭПС потребляет энергию основной частоты на осуществление тяги и питания необходимого оборудования, а также на образование потока высших гармонических составляющих, которые поступают во внешнюю сеть. Искривление синусоидальности напряжения приводит к увеличению потерь электрической энергии в двигателях, трансформаторах и линиях электропередач, ухудшается работу приборов измерения и устройств защиты. Уменьшается срок службы силового оборудования из-за возникновения повышенных температурных режимов.

Так как ЭПС является однофазным потребителем, а внешняя сеть имеет трехфазное исполнение, это приводит к появлению поперечной несимметрии [4,5], которая оказывает

негативное влияние на срок службы оборудования в следствии возникновения токов обратной и нулевой (для четырехпроводной сети) последовательности, повышения рабочих температур и возникновения вибраций.

Из-за резкопеременной нагрузки, создаваемой ЭПС, в следствии изменения профиля пути и скоростных режимов возникает значительное отклонение напряжения на определенных участках межподстанционных зон, что так же сказывается на надежности и эффективности железнодорожного транспорта [6].

Основываясь на сказанном выше, возникает необходимость в поддержании допустимых значений показателей качества ЭЭ. Возможным вариантом является применение активных оптимизирующих устройств технологий FACTS, которые являются одним из сегментов Smart grid.

Описание модели. Для решения поставленной задачи была разработана модель СЭЖД в пакете прикладных программ MatLab [7,8]. Данная модель системы тягового электроснабжения показана на рисунке 1. Она содержит трехфазную линию электропередачи с односторонним питанием, три тяговые подстанции (ТП) и два двухпутных участка тяговой сети (ТС). В качестве нагрузки на тяговую сеть выступает имитационная модель ЭПС с рабочим током 425 А. На каждом участке находится по 2 ЭПС.

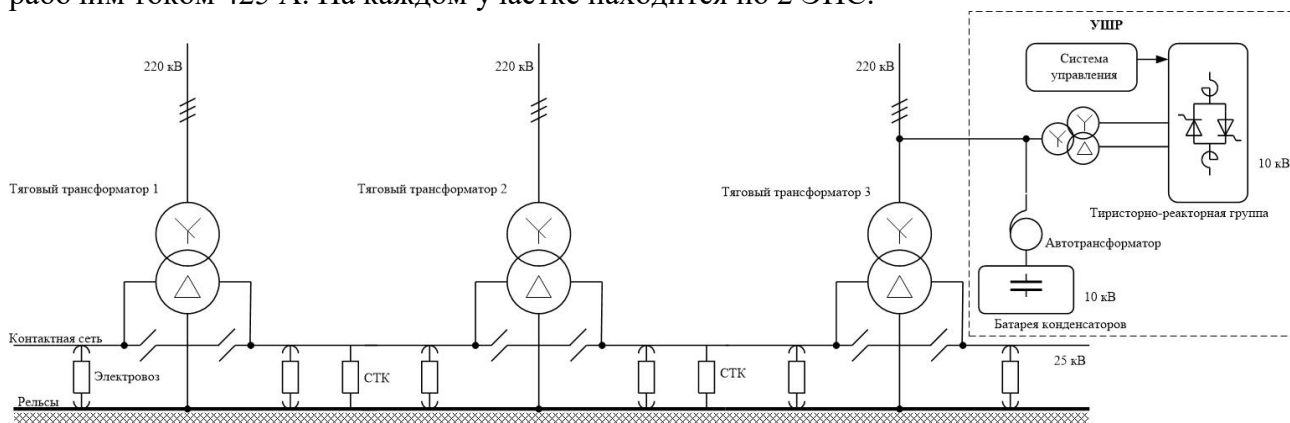


Рис. 1. Модель системы тягового электроснабжения

В качестве активных оптимизирующих устройств рассматривались математические модели трехфазного управляемого симметрирующего устройства (СУ), статического тиристорного компенсатора (СТК) и активного кондиционера гармоник (АКГ). Имитационные модели активных оптимизирующих устройств. В данной работе рассматривалось семь режимных случаев подключения устройств (таблица 1), где попеременно или комплексно вводились в работу оптимизирующие устройства.

Таблица 1

Режимные случаи подключения устройств

Номер режима	Подключаемые устройства
1	Ничего
2	СУ
3	СТК
4	АКГ
5	СУ и АКГ
6	СУ и СТК
7	СУ, АКГ и СТК

Результаты исследования. Для проведения сравнительного анализа влияния предложенных устройств рассматривались следующие показатели качества:

- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности ($K_{2u}, \%$) на питающих вводах тяговых подстанций (ТП1, ТП2, ТП3), таблица 2;

- усредненное установившееся отклонение напряжения ($(+,-)\delta U, \%$) на токоприемнике локомотива ($U_{ном}=25\text{кВ}$) и на вводах тяговых подстанций (ТП1, ТП2, ТП3), таблицы 3-5;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, $K_u, \%$ на вводах ТП3, рисунок 2.

В процессе моделирования рассматривались синусоидальность ТС (рисунок 2), несимметрия напряжений и токов (таблица 2), напряжение в контактной сети (таблица 3) и синусоидальность в питающих линиях ТП (рисунок 3).

Таблица 2

Расчетные значения коэффициентов несимметрии тока и напряжения на вводах ТП

Номер режима	$K_{2u}, \%$			$K_{2I}, \%$		
	ТП1	ТП2	ТП3	ТП1	ТП2	ТП3
1	3,583	4,24	4,632	99,72	65,04	99,17
2	1,243	1,242	1,174	99,75	65,55	99,22
3	3,567	4,171	4,532	99,74	66,81	99,13
4	3,483	4,069	4,39	99,74	64,08	99,05
5	1,017	1,003	0,8326	99,78	63,88	99,11
6	1,145	1,106	0,9997	99,77	67,03	99,18
7	1,046	1,051	0,834	99,8	66,55	99,13

Из анализа результатов, приведенных в таблице 2, можно сформулировать следующий вывод: при первом, третьем и четвертом режимных случаях $K_{2u}, \%$ выходит за допустимые пределы (2%). Установка СТК и АКГ не может обеспечить нормативные значения коэффициента несимметрии по напряжению, следовательно, отдельная установка этого оборудования по данному критерию нецелесообразна.

Таблица 3

Расчетные значения напряжений в контактной сети, кВ

Номер режима	МПЗ 1		МПЗ 2	
	$U, \text{кВ}$	$-\delta U, \%$	$U, \text{кВ}$	$-\delta U, \%$
1	21,99	12,04	21,21	15,16
2	21,54	13,84	22,12	11,52
3	22,58	9,68	21,81	12,76
4	22,8	8,8	22,05	11,8
5	22,11	11,56	22,87	8,52
6	22,04	11,84	22,73	9,08
7	22,68	9,28	23,15	7,4

Таблица 4

Значение напряжения на вводах ТП

Номер режима	ТП1			ТП2			ТП3		
	$U, \text{кВ}$			$U, \text{кВ}$			$U, \text{кВ}$		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	217376	216251	228067	212792	213875	226511	211794	212472	226503
2	221545	219657	224678	217914	217795	222310	217970	216937	221557
3	218881	217269	229524	214601	214973	228112	213796	213542	228104
4	219896	218775	230821	215882	216620	229529	215175	215301	229521
5	222463	221092	224925	219069	219295	222460	219043	218322	221296
6	222066	220229	224673	218575	218420	222249	218639	217489	221254
7	222553	221411	225320	219170	219586	222822	219093	218480	221455

Отклонение напряжения на вводах ТП*

Номер режима	ТП1			ТП2			ТП3		
	$U, \text{кВ}$			$U, \text{кВ}$			$U, \text{кВ}$		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	-1,19	-1,70	3,67	-3,28	-2,78	2,96	-3,73	-3,42	2,96
2	0,70	-0,16	2,13	-0,95	-1,00	1,05	-0,92	-1,39	0,71
3	-0,51	-1,24	4,33	-2,45	-2,28	3,69	-2,82	-2,94	3,68
4	-0,05	-0,56	4,92	-1,87	-1,54	4,33	-2,19	-2,14	4,33
5	1,12	0,50	2,24	-0,42	-0,32	1,12	-0,43	-0,76	0,59
6	0,94	0,10	2,12	-0,65	-0,72	1,02	-0,62	-1,14	0,57
7	1,16	0,64	2,42	-0,38	-0,19	1,28	-0,41	-0,69	0,66

*Примечание: номинальное напряжение на вводах 220кВ

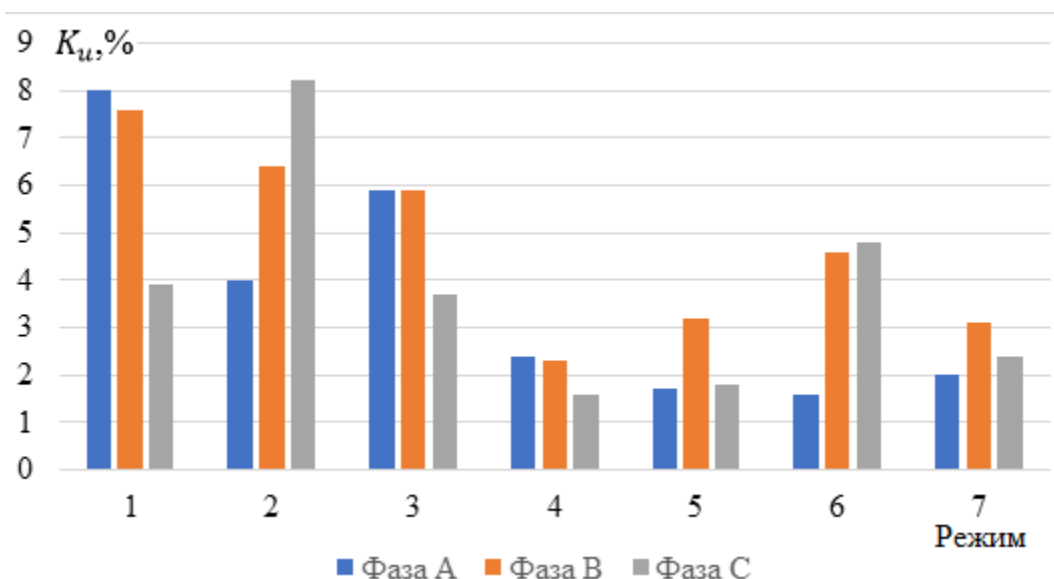


Рис. 2. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, $K_u, \%$ на вводах ТПЗ

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Наилучший результат по значению коэффициентов несимметрии тока и напряжения на вводах ТП показал 5-й вариант (СУ и АКГ). В 7-м режимном случае было дополнительно размещено СТК, как показали результаты расчётов, СТК негативно влияет на изменение коэффициентов несимметрии тока и напряжения. Если использовать СТК как единственное оптимизирующее устройство (3-й вариант), то значения K_{2u} и K_{2I} будут лучше чем при полном отсутствии устройств (1-й вариант). Использование АКГ снижает K_{2u} и K_{2I} во всех режимных случаях.

2. Значения напряжений в контактной сети не выходят за допустимые пределы (21 – 29 кВ), но как видно из таблицы 3, наименьшее отклонение напряжения было получено при 7-м варианте подключения используемых устройств.

3. Отклонения напряжения на вводах ТП на фазах А и В оказались наименьшим при 7-м варианте расположения устройств. Наименьшее отклонение напряжения на фазе С при 6-м варианте (таблица 4).

4. Наилучший результат снижения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (K_u) показал 4-й вариант (рисунок 2), когда используется только АКГ.

Заключение. Как видно из приведённых результатов, использование каждого оптимизирующего устройства влияет на изменение всех рассматриваемых показателей качества. В некоторых вариантах возможно ухудшение определенного критерия при использовании одного из устройств. Локальное управление одиночным оптимизирующим

устройством не всегда может обеспечить комплексное улучшение показателей качества и энергоэффективности, необходимо переходить к интеллектуальным [9-12] системам управления с возможностью взаимодействия группы устройств для достижения оптимального режима.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Куцый А.П. Несинусоидальные режимы в системах тягового электроснабжения, оснащенных устройствами компенсации реактивной мощности // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. 2018. № 5. С. 11-18.
2. Куцый А.П. Снижение несимметрии и несинусоидальности в линиях электропередач, питающих тяговые подстанции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 1. С. 692-696.
3. 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
4. Ушаков В.А., Куцый А.П. Снижение несимметрии в электрических сетях, питающих тяговые подстанции // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2018. №1. С. 167-168.
5. Черепанов А.В. Влияние несимметрии напряжений на энергоэффективность / А. В. Черепанов, В. А. Тихомиров, А. П. Куцый // Современные технологии. Системный Анализ. Моделирование. - 2017. - Т. 56, №4. - С. 207-217. - DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).207-217
6. Черепанов А.В., Куцый А.П., Хисамов А.Р. Влияние режимов систем внешнего электроснабжения на пропускную способность системы тягового электроснабжения // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 2. С. 8-14.
7. 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.
8. Electric energy quality management in railways power supply systems / Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. [and others] // Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway ISMR 2018. Beijing: China Railway Publishing House. 2018. - P. 314-318.
9. Платонов Д.Н., Пузина Е.Ю. Автоматизированная система управления технологическими процессами тяговой подстанции // Транспорт-2015: тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2015. С. 77-80.
10. Лундалин А.А., Пузина Е.Ю., Худоногов И.А. Направления развития релейной защиты и автоматики в Российских электрических сетях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2019. - № 2 (62). С. 77-85.
11. 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.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2015. 218 с.

REFERENCES

1. Kryukov A.V., Zakaryukin V. P., Kutsyi A. P. Non-sinusoidal modes in traction power supply systems equipped with reactive power compensation devices // Operational management in the electric power industry. Training of personnel and maintaining their qualifications. 2018. No. 5. pp. 11-18.

2. 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.
3. Cherepanov A.V., Tikhomirov V. A., Kutsyi A. P. Reduction of asymmetry and harmonic distortion in the areas of power supply to non-traction consumers // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2017. No. 3 (55). pp. 145-151
4. Ushakov V. A., Kutsyi A. P. Reduction of asymmetry in electric networks feeding traction substations // Modern technologies and scientific and technical progress. 2018. No. 1. pp. 167-168.
5. Cherepanov A.V. The influence of voltage asymmetry on energy efficiency / A.V. Cherepanov, V. A. Tikhomirov, A. P. Kutsyi // Modern technologies. System Analysis. Modeling. - 2017. - Vol. 56, No. 4. - pp. 207-217. - DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).207-217
6. Cherepanov A.V., Kutsyi A. P., Khisamov A. R. Influence of modes of external power supply systems on the capacity of the traction power supply system // Transport infrastructure of the Siberian region. 2019. Vol. 2. pp. 8-14.
7. The certificate of registration of a computer program RUS 2018615172, 12.03.2018 dynamic Simulation model of traction power supply system AC 25 kV// Ushakov V. A., Kutz, A. P., Cherepanov V. A.
8. Electric energy quality management in railways power supply systems / Bulatov Yu.N., Kryukov V. A., Cherepanov V. A. [and others] // Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway ISMR 2018. Beijing: China Railway Publishing House. 2018. - P. 314-318.
9. Platonov D. N., Puzina E. Yu. Automated control system of technological processes of a traction substation // Transport-2015: tr. International scientific and practical conference Part 3. Rostov-on-Don: RSUPS, 2015. pp. 77-80.
10. Lundalin A. A., Puzina E. Yu., Khudonogov I. A. Directions of development of relay protection and automation in Russian electric networks // Modern technologies. System analysis. Modeling. - 2019. - № 2 (62). Pp. 77-85.
11. 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.
12. Zakaryukin V. P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intelligent technologies of electric power quality management. Irkutsk: IRNTU Publishing House, 2015. 218 p.

Информация об авторах

Воронина Екатерина Викторовна – студентка группы СОД 1-17-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru

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

Authors

Ekaterina Viktorovna Voronina – student of the TSS 1-17-1 group, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru

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

Для цитирования

Воронина Е.В. Повышение качества электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог [Электронный ресурс] / Воронина Е.В., Куцкий А.П. // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2021. — №2. — Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/12-2021>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения:)

For citation

Voronina E. V. Improving the quality of electric energy in railway power supply systems [Electronic resource] / Voronina E. V., Kutsyi A. P. // Young Science of Siberia: electron. scientific journal-2021. - No. 2. - Access mode: <http://mnv.irkups.ru/toma/12-2021>, free. - Blank from the screen. - Yaz. rus., eng. (accessed:)