



А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Р. Шафиков

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

Дата поступления: 17 октября, 2018 г.

СНИЖЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ, НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Аннотация. Выпрямительные электровозы обладают нелинейными вольт-амперными характеристиками и генерируют в питающие сети высшие гармоники, что сопровождается следующими негативными эффектами: снижение сроков службы оборудования, искажение учета электроэнергии, возникновение резонансных процессов и т. д. Поэтому задача снижения уровней гармонических искажений в сетях, примыкающих к тяговым подстанциям железных дорог переменного тока, имеет повышенную актуальность. В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку методов и средств снижения таких искажений в электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям железных дорог переменного тока. В основу методики определения несинусоидальных режимов положена технология моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах; при этом модели элементов электроэнергетических систем формировались в виде решетчатых схем, характеризующихся полностью связной топологией. Параметры этих схем могут быть пересчитаны на частоты высших гармоник. Моделирование проводилось применительно к системе электроснабжения, включающей восемь тяговых подстанций. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что допустимые значения суммарных коэффициентов гармоник напряжения достигаются при установке активных фильтров с двух сторон каждой межподстанционной зоны, кроме той, на которой смонтированы фильтрокомпенсирующие устройства. Практически полная компенсация гармонических искажений достигается при установке фильтров с двух сторон каждой межподстанционной зоны. Аналогичные результаты могут быть получены при установке трехфазных фильтров на шинах 220 кВ тяговых подстанций участка, однако такой вариант потребует более высоких затрат. Кроме того, трехфазные устройства отличаются более сложной системой управления и меньшей надежностью. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что проблема повышенного уровня гармонических искажений в сетях, питающих тяговые подстанции, может быть решена на основе использования активных фильтров.

Ключевые слова: несинусоидальные режимы в системах электроснабжения железных дорог, активные фильтры (кондиционеры) гармоник.

A. V. Kryukov, A. V. Cherepanov, A. R. Shafikov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Received: October 17, 2018

REDUCTION OF HARMONIC DISTORTIONS IN HIGH-VOLTAGE NETWORKS FEEDING TRACTION SUBSTATIONS BASED ON ACTIVE FILTERS

Abstract. Rectifier electric locomotives possess nonlinear current voltage characteristics and generate the upper harmonics into power lines. This results in the following negative effects: decrease in the inventory service life, electricity metering distortion, emergence of resonant processes etc. Therefore, the problem of decrease in levels of harmonic distortions in the networks adjoining traction substations of the alternating-current railroads has the increased relevance.

The article presents the results of the researches for the development of methods and means to decrease harmonic distortions in the electrical networks adjoining traction substations of the alternating-current railroads. The technology of the electrical power systems (EPS) operation modeling in phase coordinates is the basis for the nonsinusoidal modes definition technique. At the same time, models of the EPS elements were formed as the trellised schemes which are characterized by full-coherent topology. Parameters of these schemes can be recalculated for frequencies of the upper harmonics.

The modeling was carried out in relation to the power supply system including eight traction substations. Results of the modeling allow drawing a conclusion that permissible values of total coefficients of voltage harmonics are reached after installation of the fissile filters from two parts of each intersubstation zone (IZ), except IZ on which passive filters are mounted. Near-complete compensation of harmonic distortions is reached after installation of filters from two parts of each IZ. Similar results can be obtained after installation of three-phase filters on the 220 kV buses of traction substations of the site. However, such option will involve higher costs. Besides, three-phase devices differ in more complex system of management and smaller reliability.



On the basis of the obtained results it is possible to draw a conclusion that the problem of the increased level of harmonic distortions in the feeding networks of traction substations can be solved on the basis of use of the fissile filters.

Keywords: nonsinusoidal modes in power supply systems of the railroads, fissile filters (conditioners) of harmonics.

Введение

Выпрямительные электровозы обладают нелинейными вольтамперными характеристиками и генерируют в питающие сети высшие гармоники (ВГ) [1–5], что сопровождается такими негативными эффектами, как снижение сроков службы оборудования, искажение учета электроэнергии, возникновение резонансных процессов и т. д. [6–15]. Следовательно, задача снижения уровней гармонических искажений в сетях, примыкающих к тяговым подстанциям (ТП) железных дорог переменного тока, имеет повышенную актуальность.

В статье представлены результаты компьютерных исследований, направленных на определение эффективности использования активных фильтров (кондиционеров) для снижения гармонических искажений в высоковольтных электрических сетях, примыкающих к ТП железных дорог переменного тока.

Результаты компьютерного моделирования

Моделирование проведено применительно к системе электроснабжения (СЭС) двухпутного участка железной дороги, протяженностью 376 км. Структурная схема СЭС показана на рис. 1 и включает систему внешнего электроснабжения, выполненную на основе электрических сетей 110–220–500 кВ, и систему тягового электроснабжения (СТЭ) 25 кВ, в состав которой входят восемь тяговых подстанций и семь межподстанционных зон (МПЗ). Общая протяженность участка составляет 376 км. Максимальная длина МПЗ равна 73 км, средняя – 50 км, минимальная – 37 км. Продольный профиль участка представлен на рис. 2. На

МПЗ ТП 3 – ТП 4 есть протяженный подъем в 10 % для четных поездов, в основном же уклоны не превышают 10 %. Межподстанционные зоны ТП 1 – ТП 2, ТП 2 – ТП 3 и ТП 6 – ТП 7 отличаются достаточно большой протяженностью, превышающей 60 км, остальные МПЗ имеют меньшую длину. Последняя упомянутая зона не критична в связи с наличием подъема для легких нечетных поездов и спуска для тяжелых четных.

При моделировании рассматривалось движение 15 поездов в четном и нечетном направлениях (рис. 3). Распределение поездов по массам проиллюстрировано на рис. 4. Токовые профили поездов массой 1 600 и 7 100 т представлены на рис. 5.

Моделирование выполнено с помощью программного комплекса «Fazonord» [16]. В его основу положена технология моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС) в фазных координатах, при этом модели элементов ЭЭС формировались в виде решетчатых схем, характеризующихся полностью связной топологией [16–17]. Параметры этих схем могут быть пересчитаны на частоты ВГ, что позволяет определять несинусоидальные режимы.

Средние и максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник фазных напряжений на шинах 220 (110) кВ ТП рассматриваемого участка приведены в табл. 1. Результаты получены при включении всех устройств компенсации реактивной мощности. Динамика изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих показана на рис. 6. Спектральный состав напряжений показан на рис. 3.

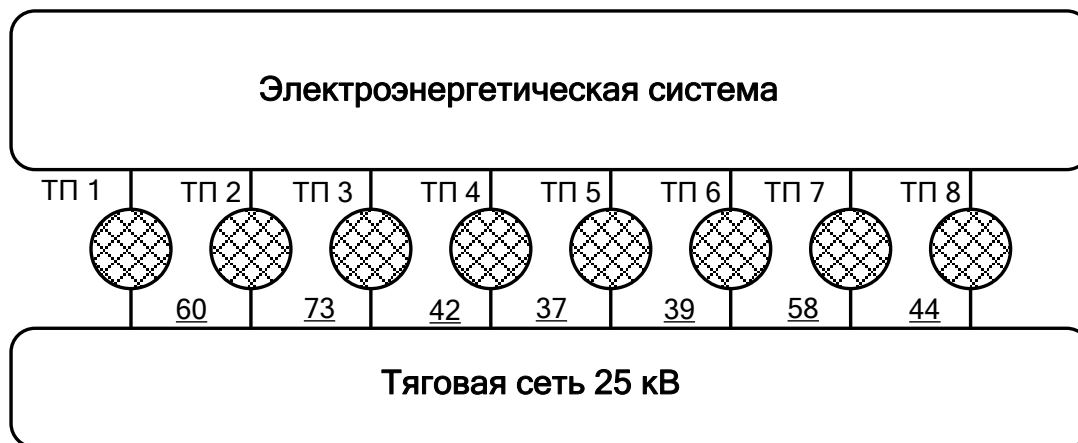


Рис. 1. Схема электроснабжения участка (цифрами обозначены длины межподстанционных зон)

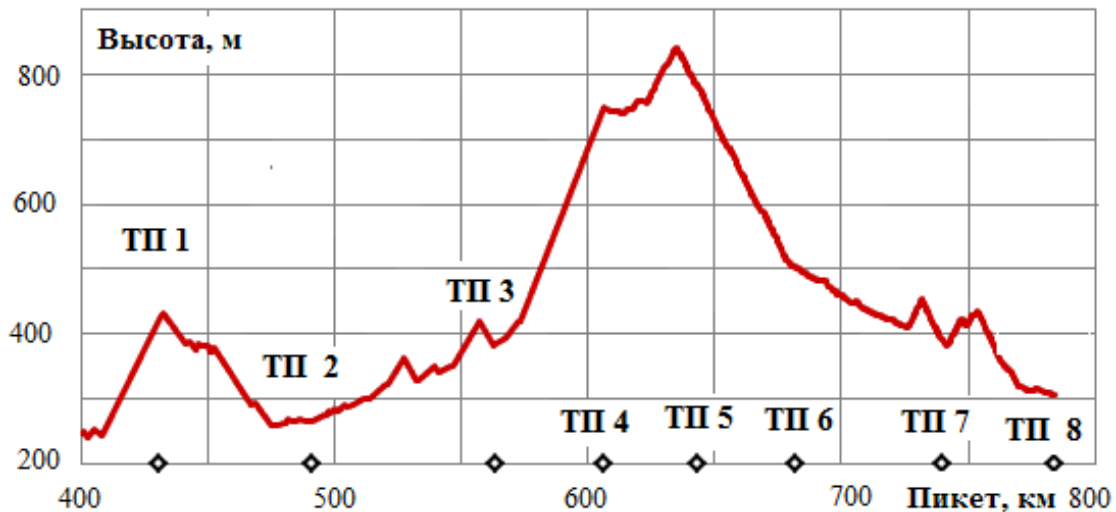


Рис. 2. Продольный профиль участка (ромбиками обозначены места расположения тяговых подстанций)

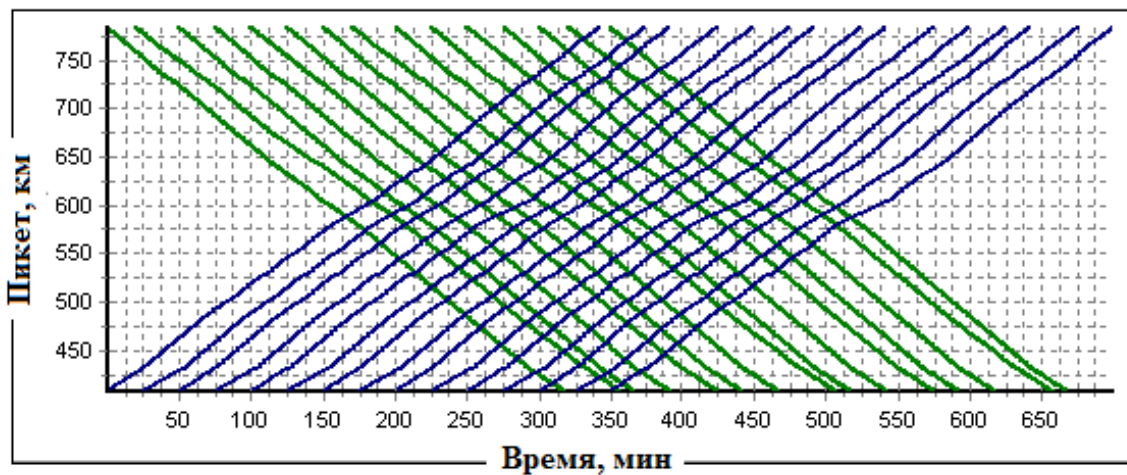


Рис. 3. График движения

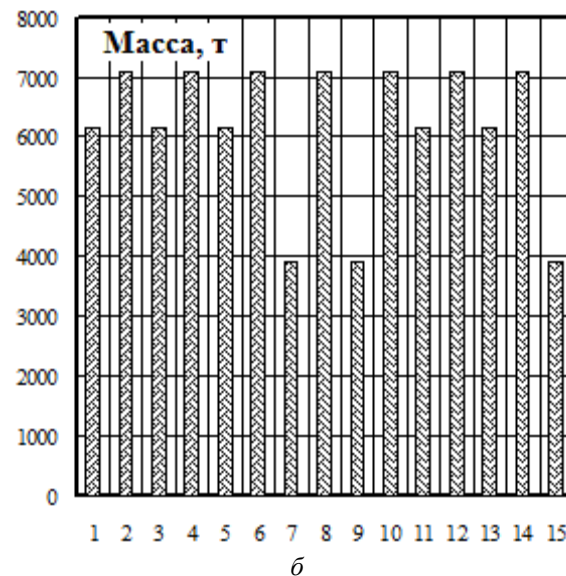
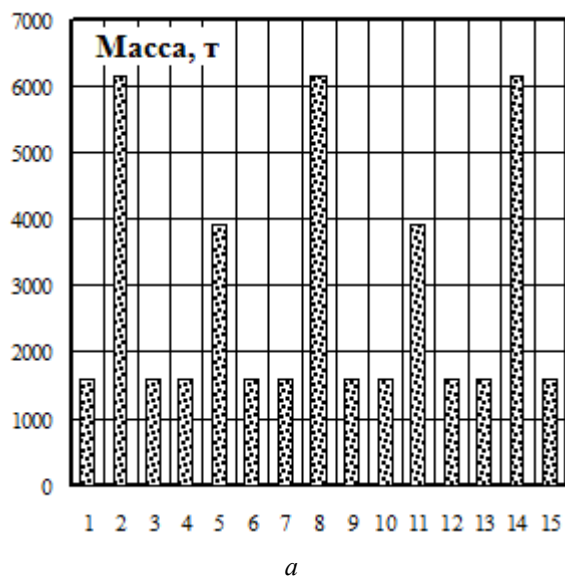
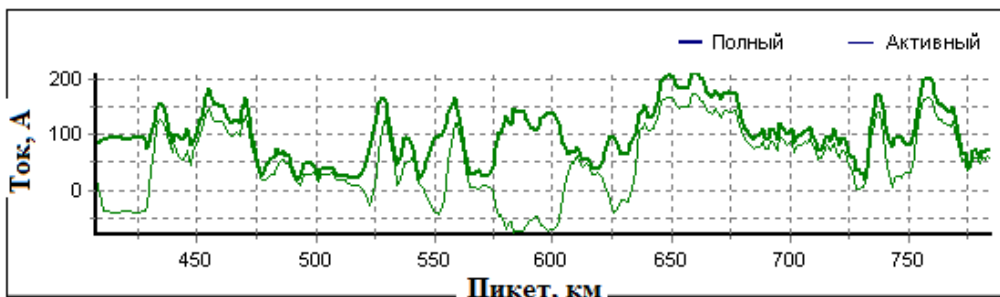
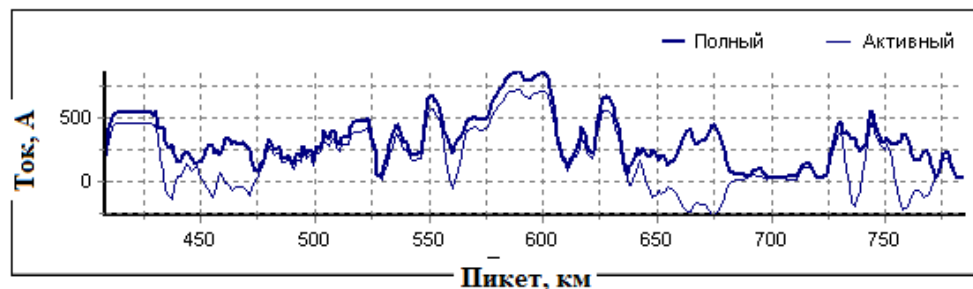


Рис. 4. Распределение поездов по массам:
а – нечетные; б – четные



a



b

Рис. 5. Токопотребление поездов:

a – нечетный поезд массой 1 600 т; б – четный поезд 7 100 т

Т а б л и ц а 1

Суммарные коэффициенты гармоник фазных напряжений на шинах 220 кВ подстанций участка, %

Параметр	Тяговая подстанция								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , кВ	220	220	220	220	220	220	220	220	110
k_{UA} сред.	2,9	5,6	7,4	6,7	7,4	6,4	5,6	4,3	3,1
k_{UA} макс.	4,0	8,5	11,7	10,1	12,1	9,8	9,2	6,8	5,0
k_{UB} сред.	3,1	5,5	7,6	8,2	8,1	7,8	6,7	5,4	4,4
k_{UB} макс.	4,3	7,4	10,6	11,9	11,4	11,2	9,6	7,6	6,2
k_{UC} сред.	2,8	4,8	6,6	7,2	7,1	6,9	6,1	4,8	4,3
k_{UC} макс.	4,1	6,7	9,5	11,6	11,0	11,0	9,9	7,8	7,6

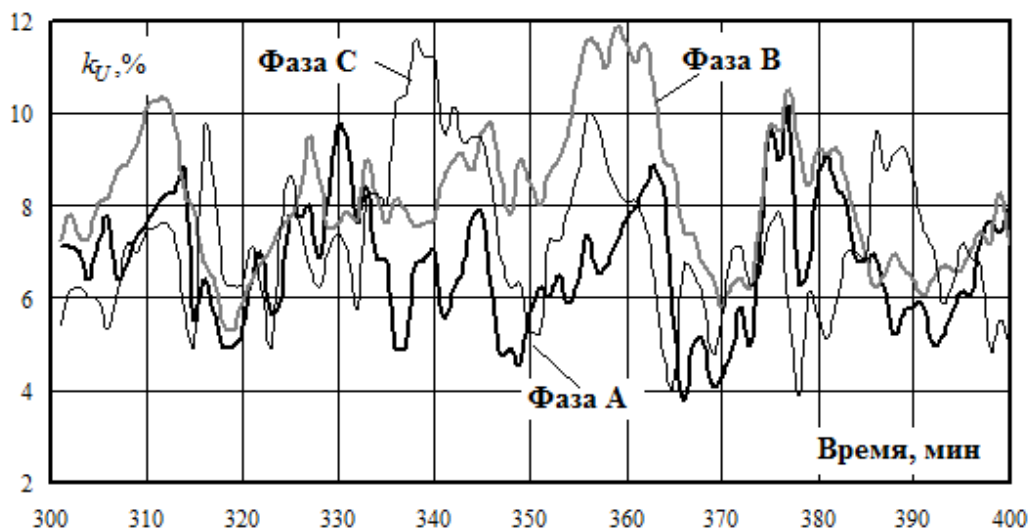


Рис. 6. Динамика изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих на шинах 220 кВ ТП 4



Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что уровни гармонических искажений далеко выходят за предельно допустимые значения в 3 %. Динамика изменений суммарных коэффициентов гармоник отличается значительными колебаниями (см. рис. 6). В спектральном составе высших гармоник преобладает пятая гармоника (рис. 7). Наличие большого уровня ВГ приводит к искажению синусоидальности кривых напряжения и тока. На рис. 8 для примера показаны формы кривых напряжений на шинах 220 кВ подстанции ТП 4.

Для снижения уровней несинусоидальности в системах электроснабжения железных дорог переменного тока могут использоваться следующие технологии:

- фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), являющиеся традиционными средствами ограничения уровня гармоник в тяговых сетях;
- активные кондиционеры гармоник [18–26];
- гибридные фильтры, представляющие собой комбинацию АКГ и ФКУ [18].

Решение проблемы снижения гармонических искажений на основе ФКУ затруднительно. Более эффективным средством повышения качества электроэнергии по критерию несинусоидальности кривых напряжения являются активные кондиционеры гармоник (АКГ), использующие последние достижения в области создания автономных инверторов на базе силовых IGBT модулей. Наиболее перспективно построение активного фильтра на основе комбинации автономного инвертора на IGBT модулях и пассивного фильтра. Такую комбинацию называют гибридным фильтром. Информационная часть АКГ осуществляет анализ нелинейного тока, а силовая часть устройства в виде автономного инвертора генерирует в сеть такие же гармоники, но с противоположной фазой. Поглощающие свойства фильтра распространяются практически на весь спектр ВГ, генерируемых электровозами. АКГ, выпускаемые в настоящее время зарубежными фирмами, рассчитаны на использование в основном в сетях низкого и среднего напряжения, но достаточно реально

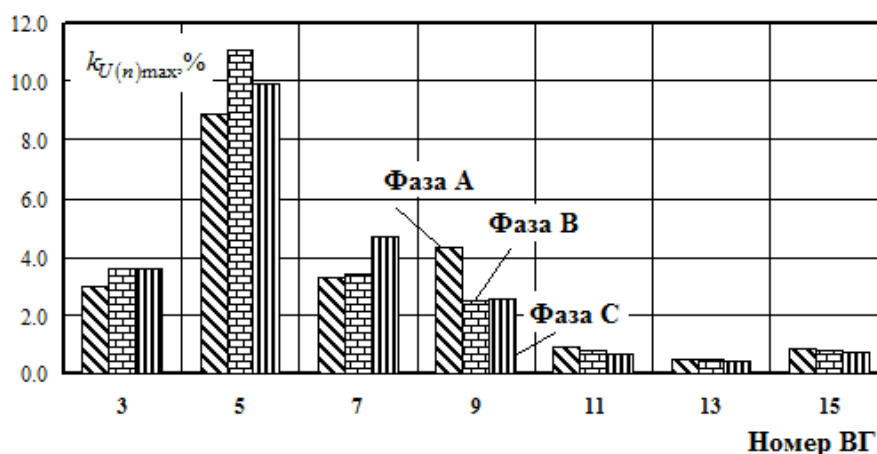


Рис. 7. Спектральный состав напряжения на шинах 220 кВ тяговой подстанции

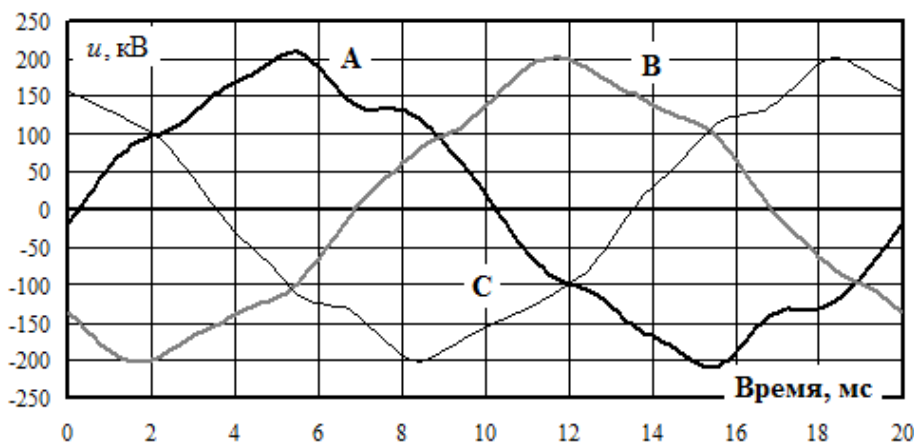


Рис. 8. Формы кривых напряжений на шинах 220 кВ тяговой подстанции



создание высоковольтного АКГ, включаемого непосредственно на стороне 27,5 кВ без согласующих трансформаторов.

Имитационная модель АКГ

На основе идеализированных моделей, реализуемых в программном комплексе «Fazonord», может быть адекватно промоделирована основная функция АКГ, заключающаяся в существенном уменьшении амплитуд высших гармоник (ВГ) в точке подключения устройства. Значительное снижение напряжений ВГ в месте расположения АКГ исключает возможность появления резонансов, которые могут возникнуть при использовании ФКУ. На рис. 9 показана модель АКГ, реализующая подавление высших гармоник и практически не вносящая дополнительных реактансов в расчетную схему.

Расчеты с помощью программного комплекса «Fazonord» проведены для следующих режимов:

- АКГ отсутствуют;
- АКГ установлены на фидерах 27,5 кВ с двух сторон межподстанционных зон с наибольшими потребляемыми токами ТП 4 – ТП 5 и ТП 5 – ТП 6;

- АКГ установлены на фидерах 27,5 кВ с двух сторон МПЗ ТП 3 – ТП 4, ТП 4 – ТП 5, ТП 5 – ТП 6, ТП 6 – ТП 7;
- АКГ установлены на фидерах 27,5 кВ с двух сторон каждой МПЗ, кроме МПЗ ТП 1 – ТП 2;
- АКГ установлены на фидерах 27,5 кВ с одной из сторон каждой МПЗ.
- АКГ установлены с двух сторон каждой МПЗ.

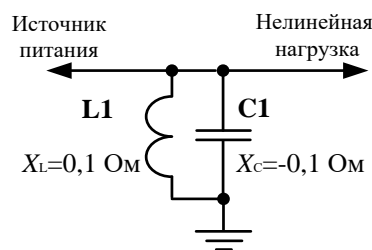


Рис. 9. Модель активного кондиционера гармоник

Результаты моделирования приведены в табл. 2 и на рис. 10 и 11. При установке АКГ с двух сторон каждой МПЗ коэффициенты гармоник фазных напряжений не превышают долей процента.

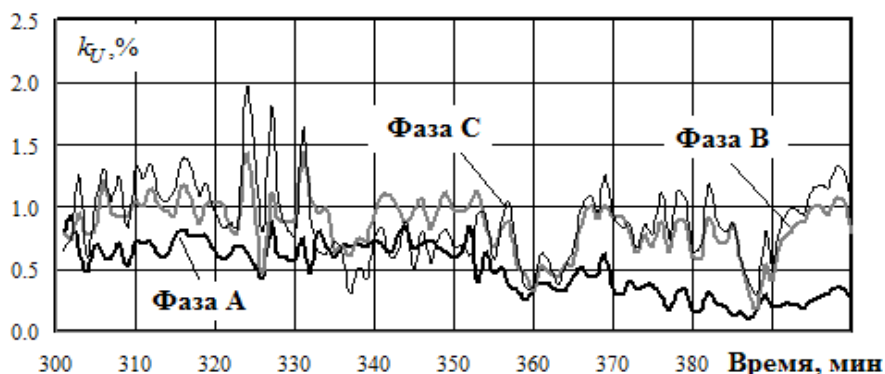


Рис. 10. Динамика изменений суммарного коэффициента гармоник на шинах 220 кВ тяговой подстанции 4 при установке активных кондиционеров гармоник с двух сторон каждой межподстанционной зоны, кроме межподстанционной зоны тяговых подстанций 1–2

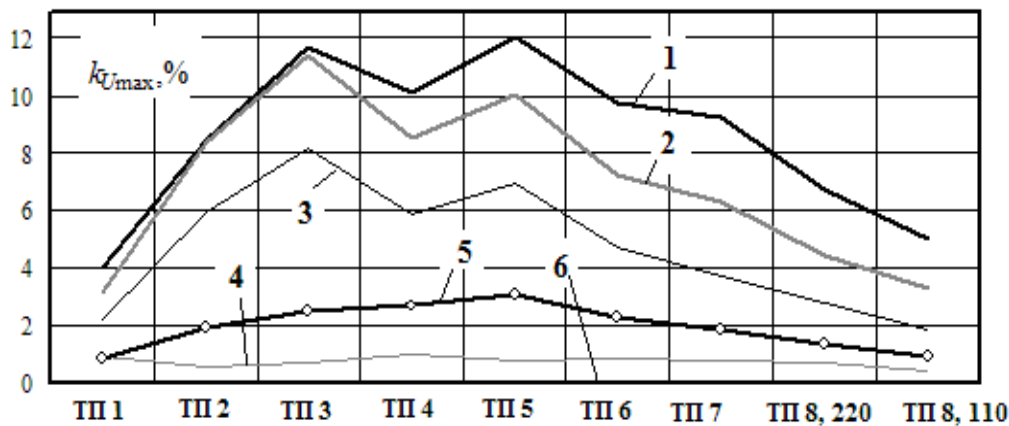
Таблица 2

Суммарные коэффициенты гармоник (%) фазных напряжений на шинах 220 кВ тяговых подстанций участка с активным кондиционером гармоник с двух сторон каждой межподстанционной зоны, кроме зон тяговых подстанций 1–2

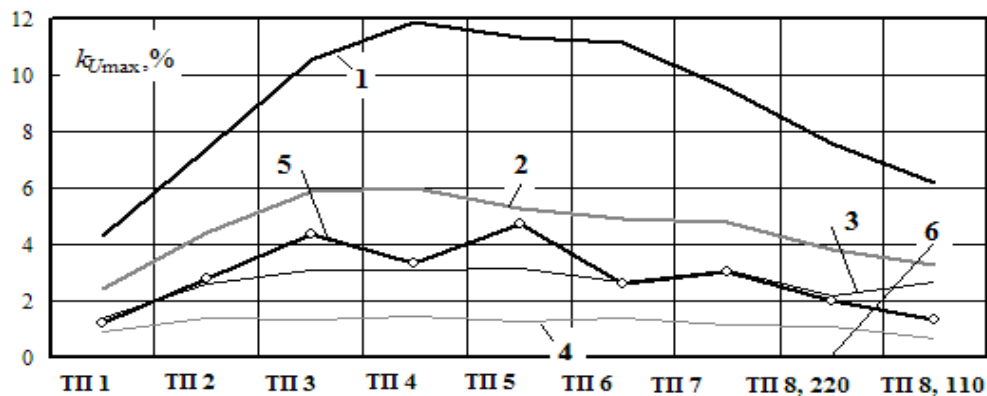
Параметр	Тяговая подстанция								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U, кВ	220	220	220	220	220	220	220	220	110
k _{UA} сред.	0,47	0,34	0,38	0,51	0,38	0,46	0,40	0,40	0,25
k _{UA} макс.	0,92	0,58	0,70	0,94	0,75	0,84	0,77	0,72	0,45
k _{UB} сред.	0,56	0,86	0,79	0,85	0,74	0,80	0,59	0,59	0,35
k _{UB} макс.	0,90	1,35	1,32	1,44	1,27	1,39	1,12	1,10	0,66
k _{UC} сред.	0,62	0,96	0,93	0,89	0,82	0,89	0,68	0,71	0,37
k _{UC} макс.	1,33	1,66	1,69	1,97	1,60	1,88	1,47	1,47	0,83



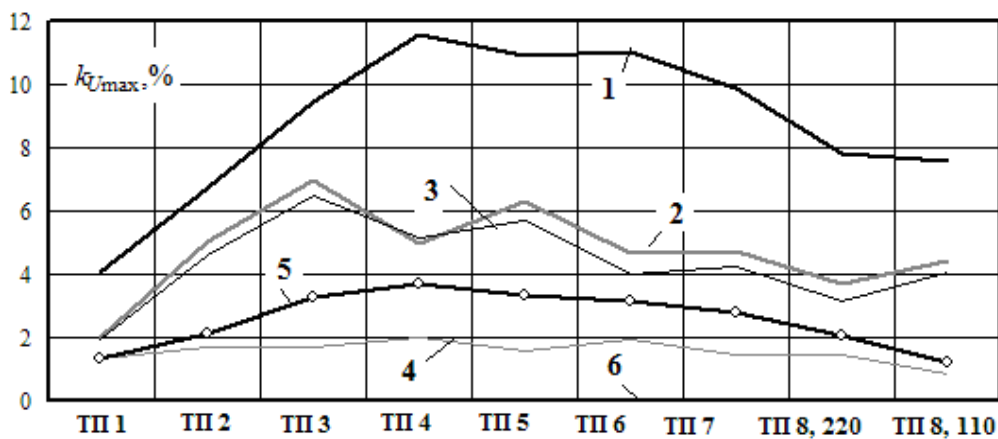
Зависимости напряжений и токов от времени при АКГ с двух сторон всех межподстанционных зон и при отсутствии АКГ проиллюстрированы на рис. 6–13.



а



б

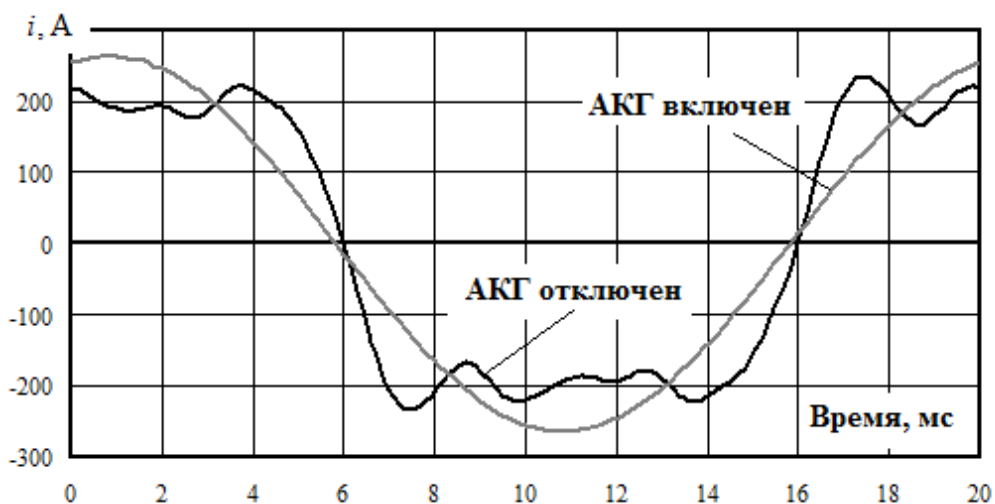


в

Рис. 11. Максимальный суммарный коэффициент гармоник на шинах 220 кВ тяговых подстанций участка:

а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

Примечание. 1 – без АКГ; 2 – АКГ на ТП 4–ТП 5 и ТП 5–ТП 6–5, 5–6; 3 – АКГ на МПЗ ТП 3 – ТП 4, ТП 4 – ТП 5, ТП 5 – ТП 6, ТП 6 – ТП 7; 4 – АКГ с двух сторон каждой МПЗ, кроме МПЗ ТП 1 – ТП 2; 5 – АКГ с одной стороны каждой МПЗ; 6 – по два АКГ на каждой МПЗ.

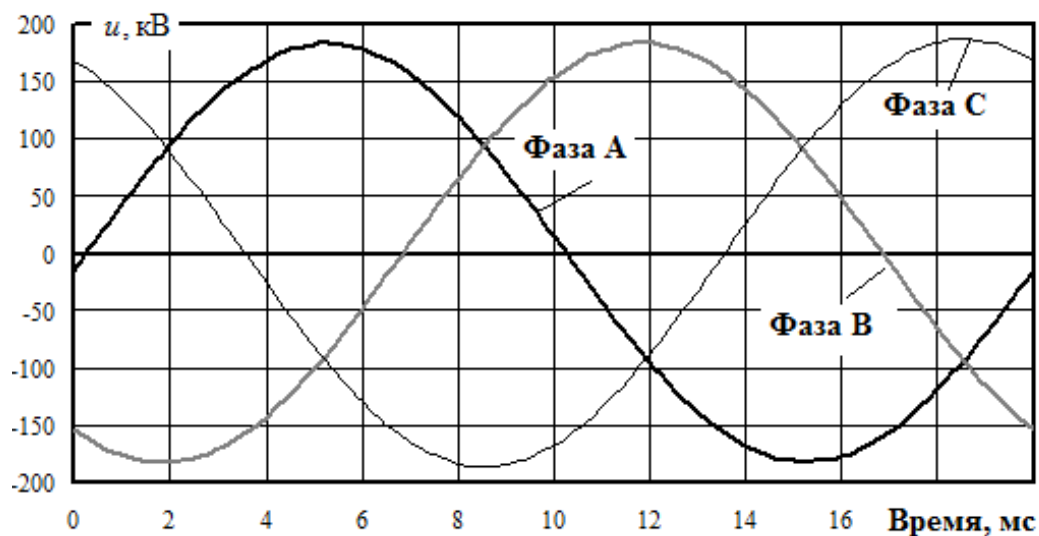


а

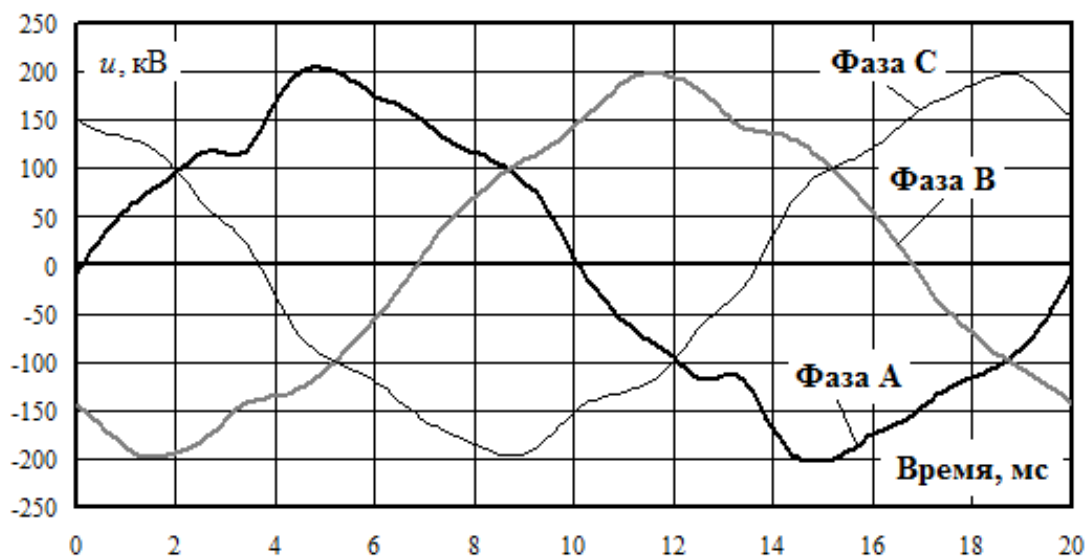


б

Рис. 12. Формы кривых токов фидера 27,5 кВ тяговой подстанции 5:
а – левое плечо; б – правое плечо



а)



б)

Рис. 13. Форма кривых напряжений на шинах 220 кВ тяговой подстанции 5:

а – кондиционеры включены; б – кондиционеры отключены

Представленные результаты дают возможность сформулировать вывод о том, что допустимые значения суммарного коэффициента гармоник напряжения достигаются при установке АКГ, рассчитанных на компенсацию эффективных токов высших гармоник в 250 А, с двух сторон каждой МПЗ, кроме МПЗ ТП 1 – ТП 2, на которой установлены фильтрокомпенсирующие устройства.

Практически полная компенсация гармонических искажений достигается при установке АКГ с двух сторон каждой МПЗ, включая зону ТП 1 – ТП 2. Аналогичные результаты могут быть получены при установке трехфазных АКГ на шинах 220 кВ тяговых подстанций участка, однако такой

вариант потребует более высоких затрат. Кроме того, трехфазные устройства отличаются более сложной системой управления и меньшей надежностью.

Заключение

Таким образом, на основе гибридных фильтров проблема снижения гармонических искажений в сетях, питающих тяговые подстанции рассматриваемого участка, может быть полностью решена.

Значительно понизить величины суммарного коэффициента гармоник напряжения удается с установкой АКГ с одной стороны МПЗ, но при этом требования стандарта по несинусоидальности в полном объеме не соблюдаются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
2. Тимофеев Д.В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. М.-Л. : Энергия, 1965. 224 с.
3. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
4. Energieversorgung elektrischer bannen / Н. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. Wiesbaden : V.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
5. Аррилага Д., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М. : Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
6. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электропитания / С.Ю. Долингер и др. // Омский научн. вестник. 2013. № 2 (120). С. 178–183.
7. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В. Влияние качества электроэнергии на сокращение срока службы и снижение надежности электрооборудования // Электрика. 2008. № 3. С. 14–20.
8. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М. : Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
9. Каргин С.В., Краснова А.Н., Бекбулатов Р.Р. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях общего назначения. М. : НТФ Энергопрогресс, 2012. 108 с.
10. Карташов И.И., Зуев Э.Н. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. М. : МЭИ, 2000. 120 с.



11. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов и др. М. : МЭИ, 2006. 320 с.
12. Третьяков Е.А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2013. 195 с.
13. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев : Наукова думка, 1985. 268 с.
14. Шидловский А.К., Новский В.А., Каплычнин Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. Киев : Наукова думка, 1989. 312 с.
15. Долгов А.П., Кандаков С.А., Закарюкин В.П. Улучшение качества электроэнергии в системах внешнего электроснабжения железных дорог Восточной Сибири // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте. СПб., 2011. С. 37–38.
16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2011. 160 с.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Иркут. гос. ун-т, 2005. 273 с.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск : Изд-во ИрНИТУ, 2015. 218 с.
19. Шевчук А.П. Применение теорий нечеткой логики при компенсации высших гармоник активным фильтром // Записки горного института. 2009. Т. 182. С. 137–140.
20. Жуков Н.А. Анализ систем управления активными фильтрами гармоник // Образование. Наука. Производство. М., 2015. С. 2988–2992.
21. Чередников А.В. Анализ законов управления активными фильтрами гармоник // Современные инновации в науке и технике. Белгород, 2013. С. 200–204.
22. Замула К.В., Соколов Ю.В., Карманов А.В. Активный фильтр гармоник как средство повышения качества электрической энергии // Энергия единой сети. 2018. № 2 (37). С. 22–32
23. Долингер С.Ю., Лютаревич А.Г., Осипов Д.С. Разработка алгоритма определения управляющего воздействия активного фильтра гармоник // Динамика систем, механизмов и машин. 2009. № 1. С. 151–154.
24. Горюнов В.Н., Осипов Д.С., Лютаревич А.Г. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник // Электро. Электротехника, Электроэнергетика, Электротехническая промышленность. 2009. № 6. С. 20–24.
25. Боярская Н.П., Дербенев А.М., Довгун В.П. Адаптивная система формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник // Ползуновский вестник. 2011. № 2-1. С. 25–29.
26. Довгун В.П., Темербаев С.А. Адаптивные алгоритмы управления характеристиками активных фильтрокомпенсирующих устройств // Электричество. 2012. № 11. С. 32–38.

REFERENCES

1. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1982. 528 p.
2. Timofeev D.V. Rezhimy v elektricheskikh sistemakh s tyagovymi nagruzkami [Modes in electrical systems with traction loads]. Moscow – Leningrad: Energiya Publ., 1965. 224 p.
3. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
4. Biesenack H., Braun E., George G. et al. Energieversorgung elektrischer bannen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
5. Arrilaga D., Bredli D., Bodzher P. Garmoniki v elektricheskikh sistemakh [Harmonics in electrical systems]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.
6. Dolinger S.Yu. et al. Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot snizheniya kachestva elektricheskoi energii v elementakh sistem elektrosnabzheniya [Estimation of additional power losses from the reduction of the quality of electric energy in the elements of power supply systems] *Omskii nauchn. vestnik [Omsk scientific herald]*, 2013. No. 2(120), pp. 178–183.
7. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L., Gorpnich A.V. Vliyanie kachestva elektroenergii na sokrashchenie stroka sluzhby i snizhenie nadezhnosti elektrooborudovaniya [The impact of power quality on reducing service life and reducing the reliability of electrical equipment]. *Elektrika [Electrical engineering]*, 2008. No. 3, pp. 14–20.
8. Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000. 331 p.
9. Kargin S.V., Krasnova A.N., Bekbulatov R.R. Upravlenie kachestvom elektroenergii v raspreditel'nykh setyakh obshchego naznacheniya [Energy quality management in general purpose distribution networks]. Moscow: NTF «Energoprogress» Publ., 2012. 108 p.
10. Kartashov I.I., Zuev E.N. Kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya. Sposoby ego kontrolya i obespecheniya [Power quality in power supply systems. Ways to control and ensure it]. Moscow: MEI Publ., 2000. 120 p.
11. Kartashov I.I. et al. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Electricity Quality Management]. Moscow: MEI Publ., 2006. 320 p.
12. Tret'yakov E.A. Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii v raspreditel'nykh setyakh zheleznykh dorog [Quality management of electrical energy in the distribution networks of railways]. Омск : ОмГУПС Publ., 2013. 195 p.
13. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh [Improving the quality of energy in electrical networks]. Kiev : Naukova dumka Publ., 1985. 268 p.



14. Shidlovskii A.K., Novskii V.A., Kaplychnyi N.N. Stabilizatsiya parametrov elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh setyakh [Stabilization of electrical energy parameters in distribution networks]. Kiev : Naukova dumka Publ., 1989. 312 p.
15. Dolgov A.P., Kandakov S.A., Zakaryukin V.P. Uluchshenie kachestva elektroenergii v sistemakh vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog Vostochnoi Sibiri [Improving the quality of electricity in the systems of external power supply of the railways of Eastern Siberia]. *Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov na zheleznodorozhnom transporte [Electrification and development of the infrastructure for power supply of train traction in rail transport]*. St. Petersburg, 2011, pp. 37–38.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: Irkut. state transport un-ty Publ., 2011. 160 p.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex non-symmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkut. un-ty Publ., 2005. 273 p.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intel'ktual'nye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii [Intelligent power quality control technology]. Irkutsk: IrNITU Publ., 2015. 218 p.
19. Shevchuk A.P. Primenenie teorii nechetkoi logiki pri kompensatsii vysshikh garmonik aktivnym fil'trom [Application of theories of fuzzy logic in the compensation of higher harmonics active filter]. *Zapiski gornogo instituta [Journal of Mining institute]*, 2009. Vol. 182, pp. 137-140.
20. Zhukov N.A. Analiz sistem upravleniya aktivnymi fil'trami garmonik [Analysis of Control Systems for Active Harmonic Filters]. *Obrazovanie, nauka, proizvodstvo [Education, Science, Production]*. Belgorod, 2015, pp. 2988-2992.
21. Cherednikov A.V. Analiz zakonov upravleniya aktivnymi fil'trami garmonik [Analysis of the laws of control of active harmonic filters]. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike [Modern innovations in science and technology]*. Belgorod, 2013, pp. 200-204.
22. Zamula K.V., Sokolov Yu.V., Karmanov A.V. Aktivnyi fil'tr garmonik kak sredstvo povysheniya kachestva elektricheskoi energii [Active harmonic filter as a means of improving the quality of electrical energy]. *Energiya edinoi seti [Energy of the Unified Network]*, 2018. No. 2 (37), pp. 22-32.
23. Dolinger S.Yu., Lyutarevich A.G., Osipov D.S. Razrabotka algoritma opredeleniya upravlyayushchego vozdeistviya aktivnogo fil'tra garmonik [Development of an algorithm for determining the control effect of an active harmonic filter]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin [Dynamics of systems, mechanisms and machines]*, 2009. No. 1, pp. 151-154.
24. Goryunov V.N., Osipov D.S., Lyutarevich A.G. Opredelenie upravlyayushchego vozdeistviya aktivnogo fil'tra garmonik [Determination of the control effect of the active harmonic filter]. *Elektro. Elektrotekhnika, Elektroenergetika, Elektrotekhnicheskaya promyshlennost' [Electro. Electrical engineering, Electrical power engineering, Electrical industry]*, 2009. No. 6, pp. 20-24.
25. Boyarskaya N.P., Derbenev A.M., Dovgun V.P. Adaptivnaya sistema formirovaniya upravlyayushchikh signalov dlya aktivnykh fil'trov garmonik [Adaptive control signal generation system for active harmonic filters]. *Polzunovskiy vestnik*, 2011. No. 2-1, pp. 25-29.
26. Dovgun V.P., Temerbaev S.A. Adaptivnye algoritmy upravleniya kharakteristikami aktivnykh fil'trokompensiruyushchikh ustroystv [Adaptive control algorithms for the characteristics of active filter-compensating devices]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 2012. No. 11, pp. 32-38.

Информация об авторах

Authors

Крюков Андрей Васильевич – д. т. н., профессор, кафедра «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Andrei Vasil'evich Kryukov – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Черепанов Александр Валерьевич – к. т. н., доцент, кафедра «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: smart_grid@mail.ru

Aleksandr Valer'evich Cherepanov – Ph.D. of Engineering Science, Associate Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: smart_grid@mail.ru

Шафиков Алексей Рафаилович – аспирант, кафедра «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: alshaficov1@mail.ru

Aleksei Rafailovich Shafikov – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: alshaficov1@mail.ru

Для цитирования

For citation

Крюков А. В. Снижение гармонических искажений в высоковольтных сетях, питающих тяговые подстанции, на основе активных фильтров / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Р. Шафиков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 36–46. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).36–46

Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Shafikov A. R. Snizhenie garmonicheskikh iskazhenii v vysokovol'tnykh setyakh, pitayushchikh tyagovye podstantsii, na osnove aktivnykh fil'trov [Reduction of harmonic distortions in high-voltage networks feeding traction substations based on active filters]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 36–46. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).36–46