



Черепанов Александр Валерьевич,

к. т. н., Иркутский государственный университет
путей сообщения,
e-mail: santela89@mail.ru

Тихомиров Владимир Александрович,

к. т. н., Иркутский государственный университет
путей сообщения,
e-mail: svat_irk@mail.ru

Куцый Антон Павлович,

аспирант, Иркутский государственный университет
путей сообщения,
e-mail: tosha1993irc@yandex.ru

A. V. Cherepanov,

Ph.D. in Engineering Science, Irkutsk State Transport University,
e-mail: santela89@mail.ru

V. A. Tikhomirov,

Ph.D. in Engineering Science, Irkutsk State Transport University,
e-mail: svat_irk@mail.ru

A. P. Kutsyi,

Ph.D. student, Irkutsk State Transport University,
e-mail: tosha1993irc@yandex.ru

Информация о статье

Дата поступления: 28 мая 2017 г.

Article info

Received: May 28, 2017

СНИЖЕНИЕ НЕСИММЕТРИИ И ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В РАЙОНАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

DECREASE IN ASYMMETRY AND HARMONIOUS DISTORTIONS IN AREAS OF POWER SUPPLY OF NON-TRACTIVE CONSUMERS

Аннотация. В электрических сетях, питающих тяговые подстанции магистральных железных дорог, а также в системах тягового электроснабжения в полном объеме применимы технологии интеллектуальных сетей (smart grid), на основе которых возможно эффективно решать задачи управления качеством электроэнергии. Особую актуальность вопрос использования этих технологий приобретает в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, где основная системообразующая электрическая сеть непосредственно связана с подстанциями железнодорожных магистралей. Ввиду значительного объема резкопеременной нелинейной однофазной тяговой нагрузки показатели качества электроэнергии в этих сетях выходят далеко за допустимые пределы.

Для электроснабжения нетяговых и нетранспортных потребителей железных дорог широко используются линии электропередачи, выполненные по схеме «два провода – рельс» (ДПР). Эти линии питаются от шин 27,5 кВ тяговых подстанций, кривые напряжения на которых имеют значительные гармонические искажения. Кроме того, наблюдается существенная несимметрия, вызванная однофазной тяговой нагрузкой. Таким образом, на отправном конце ЛЭП ДПР показатели качества электроэнергии могут выходить за допустимые пределы. На приемном конце возможно более значительное ухудшение качества электроэнергии из-за несимметричной схемы ЛЭП, а также вследствие электромагнитных влияний контактной сети. Поэтому задача улучшения качества электроэнергии в сетях, питающихся от линий ДПР, приобретает особую актуальность.

В статье представлены результаты исследований, направленных на улучшение качества электроэнергии в сетях, получающих питание от ЛЭП ДПР, на основе применения активных кондиционеров гармоник и регулируемых источников реактивной мощности, выполненных по технологиям FACTS.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, нетяговые потребители, несимметрия и гармонические искажения, улучшение качества электроэнергии.

Abstract. In the electrical networks powering tractive substations of the trunk railroads, as well as in systems of tractive electrical power supply, technologies of intellectual networks are fully applicable (“smart grid” on the basis of which is it possible to effectively solve problems of quality management of the electric power. The problem of using these technologies becomes especially relevant in Eastern Siberia and in the Far East where the main backbone electrical network is directly connected to substations of railway lines. In view of the considerable volume of sharply variable non-linear single-phase tractive loading, electric power quality figures on these networks go far beyond the allowable limits.

For electrical power supply of non-tractive and non-transport customers of the railroads, the power lines executed according to the diagram “two-wire-rail” (TWR) are widely used. These lines are powered from 27,5 kV buses of tractive substations, the power curves of which have the considerable harmonic distortions. Besides, the essential asymmetry is caused by single-phase tractive loading is observed. Thus, on the starting end of the power line of the TWR, figures of the electric power quality can go beyond the tolerable limits. On the receiving end, more considerable deterioration of the electric power is possible because of the asymmetrical diagram of the power line, and also owing to electromagnetic influences of the contact network. Therefore, the problem of improving the electric power quality on the networks powered from TWR lines has special relevance.

The article presents the results of the researches directed to improvement of quality of the electric power in the networks receiving power from the TWR power line on the basis of use of active conditioners of the harmonics and adjustable sources of reactive power executed on FACTS technologies.

Keywords: systems of electrical power supply of the railroads, non-tractive consumers, asymmetry and harmonic distortions, improving of quality of the electric power.

Введение

Для электроснабжения нетранспортных и нетяговых потребителей железных дорог [1–3] часто применяются линии электропередачи (ЛЭП), созданные по схеме «два провода – рельс» (ДПР, рис. 1). Линии получают питание от шин 27,5 кВ тяговых подстанций (ТП), на которых графики напряжения имеют значительные гармонические искажения. Кроме того, наблюдается существенная несимметрия, вызванная однофазной тяговой нагрузкой. Таким образом, на отправном конце ЛЭП, показатели качества электроэнергии (ПКЭ) могут выходить за допустимые пределы. На приемном конце ДПР возможно более значительное ухудшение ПКЭ из-за несимметричной схемы ЛЭП, а также вследствие электромагнитных влияний контактной сети (КС) [4]. Поэтому задача повышения качества электроэнергии в электрических сетях, питающихся от ДПР, приобретает особую актуальность. В настоящей статье представлены результаты исследований, направленных на улучшение ПКЭ в сетях, получающих питание от ЛЭП ДПР, на основе применения активных кондиционеров гармоник и регулируемых источников реактивной мощности (ИРМ), выполненных по технологиям FACTS (flexible alternative current transmission systems), использующие комплексы технических и информационных средств автоматического управления режимами электроэнергетических систем [5–8].

Описание проблемной ситуации и постановка задачи

Линии систем автоблокировки и продольного электроснабжения, проходящие по опорам контактной сети, попадают под электрическое и маг-

нитное влияние КС [1–3]. Электрическое влияние КС создает из-за напряжений нулевой последовательности на линиях 6–10–35 кВ, в следствие чего происходит искажение учета электрической энергии на участках головных технологических ЛЭП, которые выполнены по схеме ДПР. Электрическое влияние не приводит к повышению доли высших гармоник. Большое увеличение уровня несинусоидальности в соседних линиях ДПР происходит из-за пропорциональности наводимого напряжения магнитного влияния частоте влияющего тока [4].

В данной работе проводился анализ влияния КС на показатели качества электроэнергии (ЭЭ) для двухпутного участка железной дороги с системой электроснабжения 1×25 кВ. Питание межподстанционной зоны (МПЗ) длиной 54 км между тяговыми подстанциями ТП1 и ТП2 происходит от двухцепной ЛЭП 220 кВ. Продольное электроснабжение производится от линий ДПР со стандартным расположением проводов. Моделировались поезда массой 4000 тонн с графиком движения показанным на рис. 2. Моделирование осуществлялось на основе комплекса программ Fazonord [9, 10]. Фрагмент схемы расчетной модели системы электроснабжения показан рис. 3. Ток-профили поездов представлены на рис. 4.

Тяговая нагрузка в консольной МПЗ привела к серьезным отклонениям напряжения в конце линии ДПР. Главной причиной этого отклонения является влияние магнитного поля от КС. Различные отклонения напряжения в фазах приводят к значительной несимметрии. На рис. 5 проиллюстрировано изменение коэффициента несимметрии по обратной последовательности для тяговой подстанции, подключенной к ЛЭП ДПР.

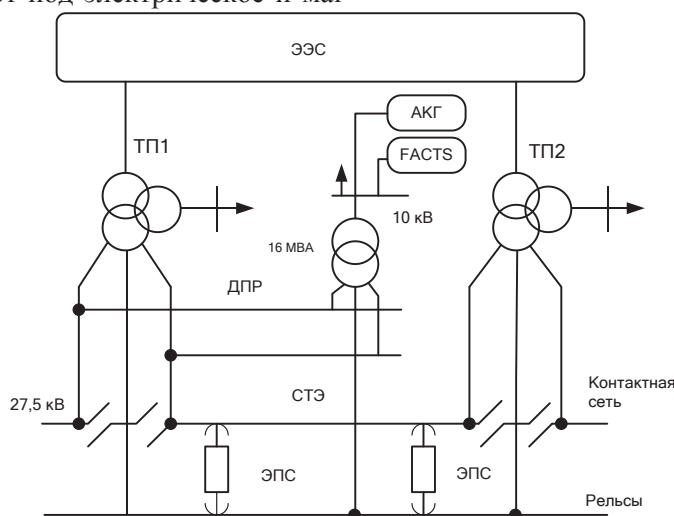


Рис. 1. Схема сетей, питающих район электроснабжения нетяговых потребителей (РЭС):

ЭЭС – электроэнергетическая система; СТЭ – система тягового электроснабжения;
АКГ – активный кондиционер гармоник; ЭПС – электроподвижной состав

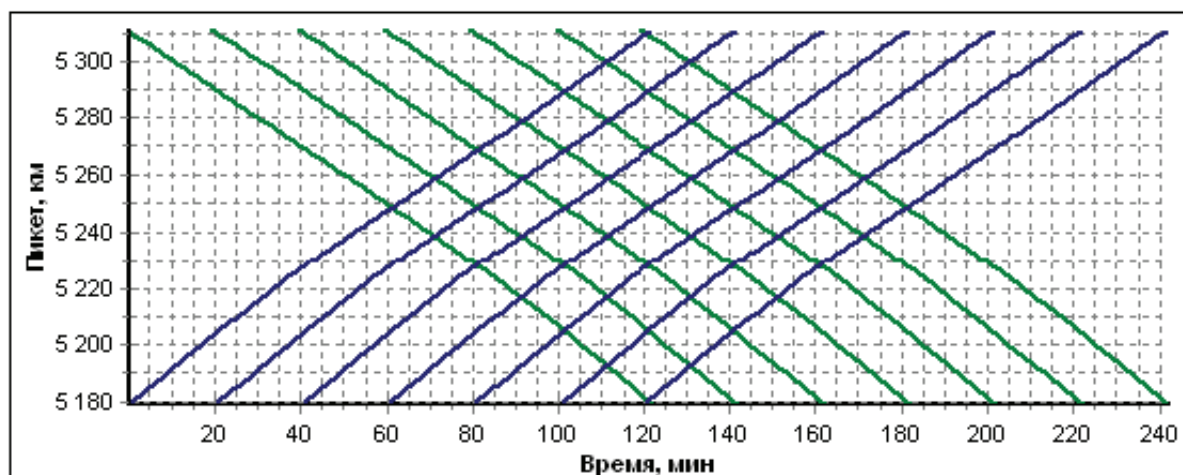


Рис. 2. График движения поездов

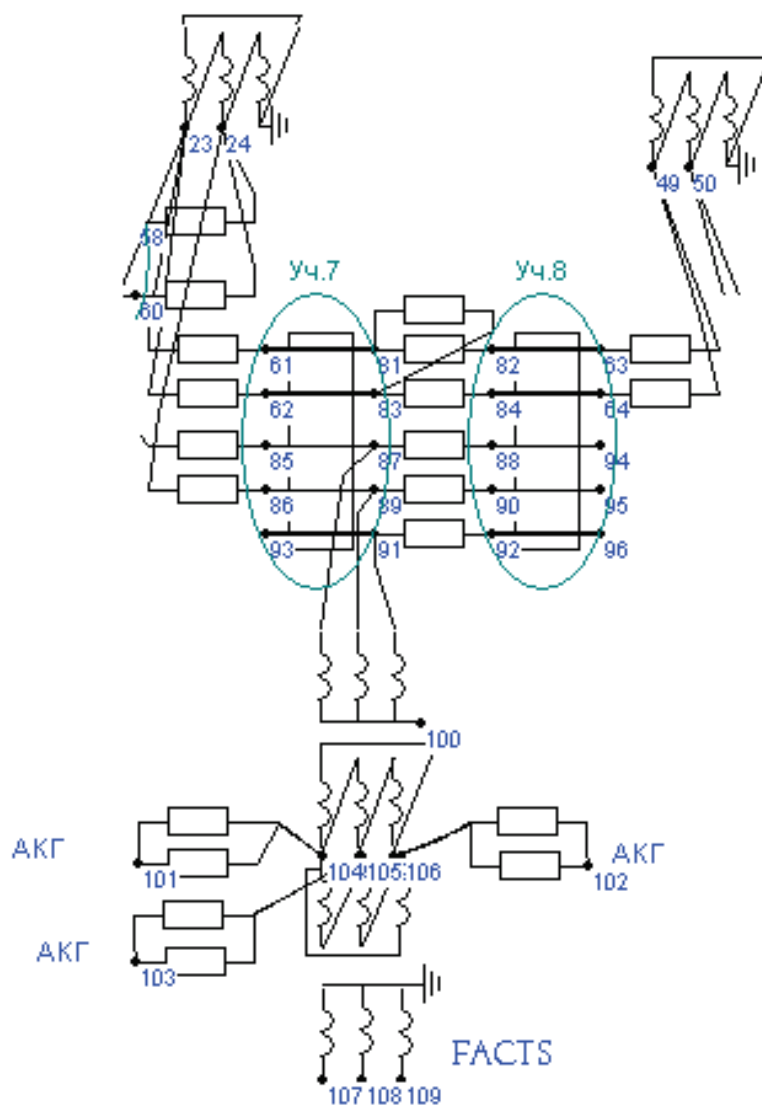
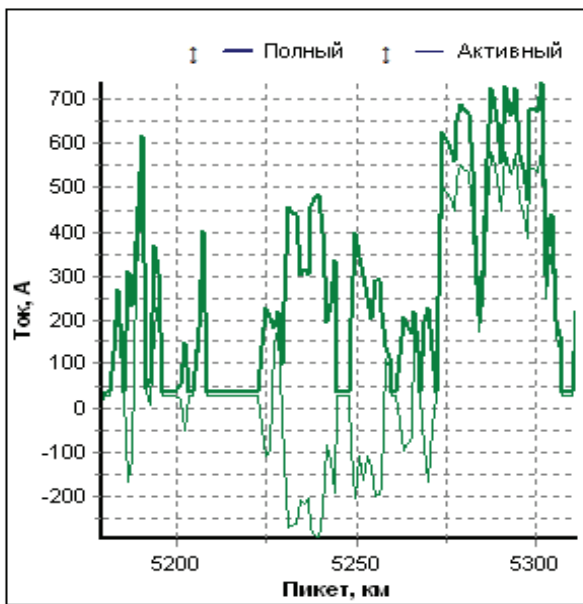
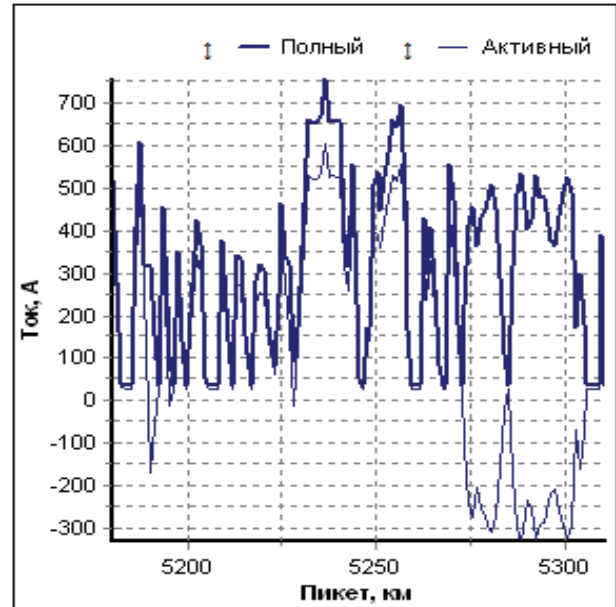


Рис. 3. Схема расчетной модели



а)



б)

Рис. 4. Токвые профили:
а – нечетный поезд; б – четный поезд

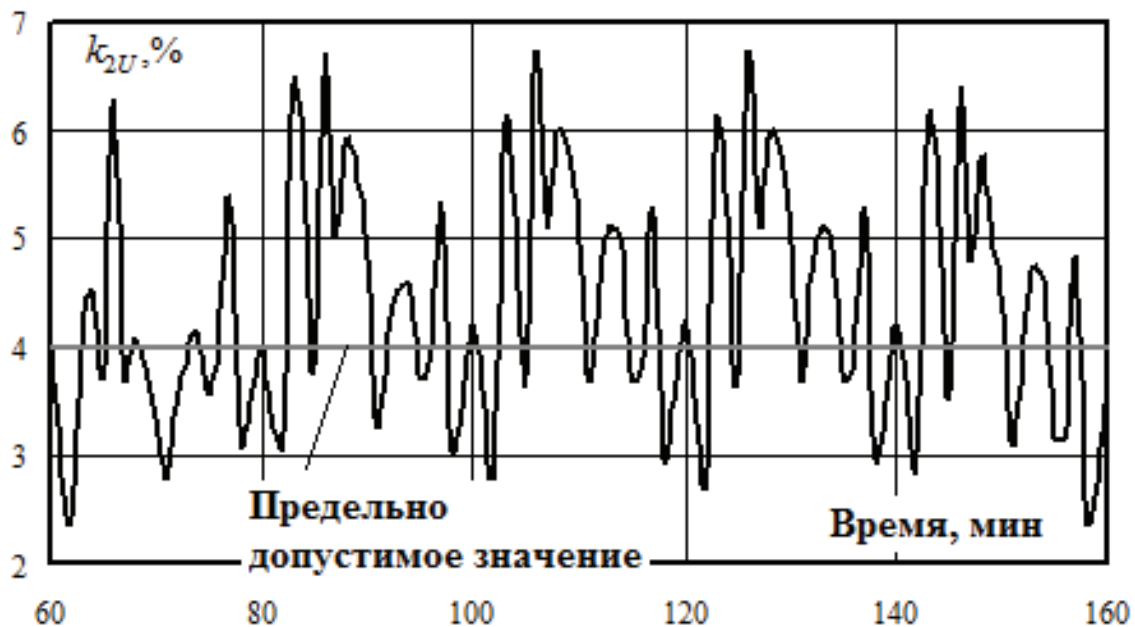


Рис. 5. Изменение коэффициента несимметрии по обратной последовательности при отсутствии средств улучшения качества ЭЭ

Наращение доли высших гармоник из-за магнитного влияния приводит к значительному увеличению несинусоидальности напряжений в

линии ДПР. В фазе В коэффициент несинусоидальности достигает 30 %, а в фазе А – 18 % (рис. 6).

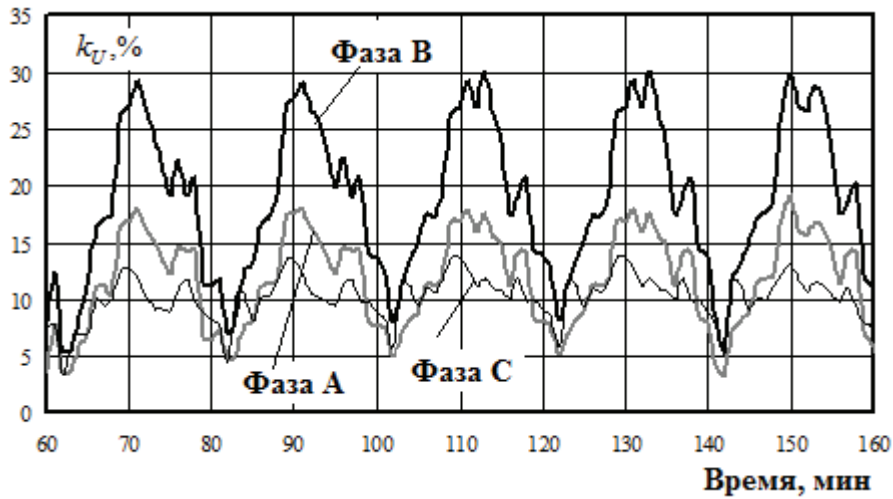


Рис. 6. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения на шинах 27,5 кВ ТП-ДПР2

Улучшение качества ЭЭ на основе активных элементов smart grid

Вопрос нормализации показателей качества ЭЭ возможно решить благодаря применению технологий интеллектуальных сетей (smart grid). Для снижения несимметрии могут использоваться пофазно управляемые устройства FACTS, а для уменьшения гармонических искажений – актив-

ные кондиционеры гармоник. Для моделирования этих устройств использовались функционально-адекватные модели, реализованные на основе фазных координат [9–20] (рис. 7, 8). Моделирование осуществлялось в комплексе программ «Fazonord-Качество», разработанного в ИрГУПС [9, 10]. Результаты моделирования представлены на рис. 9, 10.

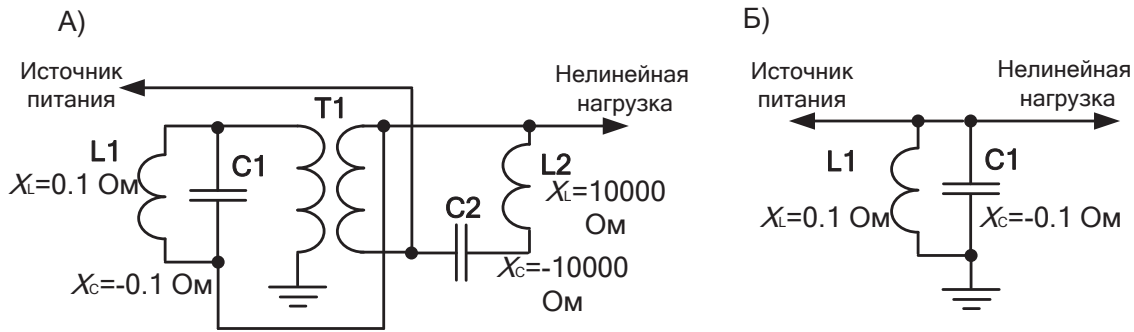


Рис. 7. Модель АКГ параллельного типа (А) и упрощенная модель фильтра шунтового типа (Б)

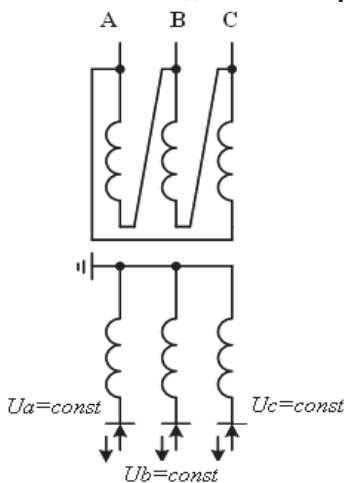


Рис. 8. Модель FACTS

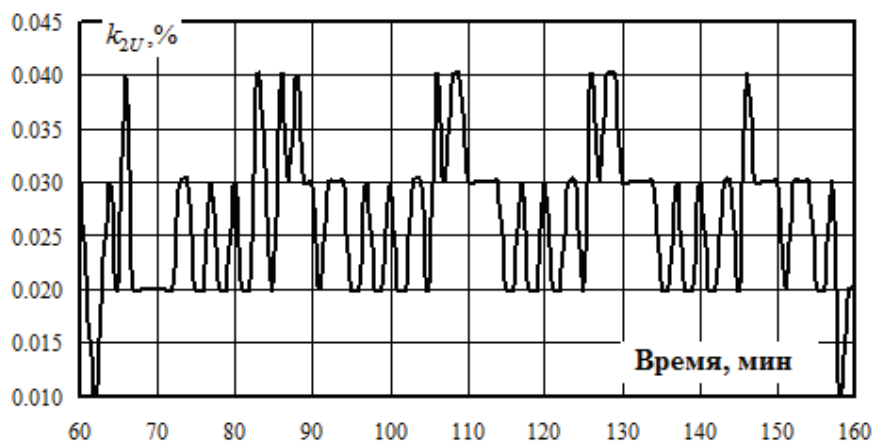


Рис. 9. Изменение коэффициента несимметрии по обратной последовательности при наличии пофазно управляемого устройства

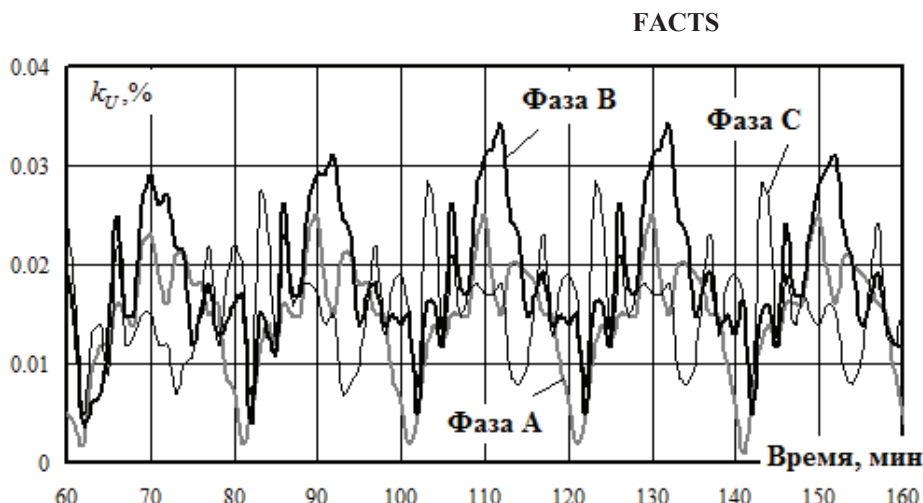


Рис. 10. Изменение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения при наличии АКГ

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что на основе АКГ и пофазно управляемых устройств FACTS может быть решена сложная проблема нормализации ПКЭ в электрических сетях, питающихся от ЛЭП железных дорог.

Заключение

Представлены результаты исследований, направленных на разработку способов повышения

качества электрической энергии в сетях, получающих питание от линий «два провода – рельс». Показано, что проблема нормализации качества ЭЭ в линиях ДПР может быть решена основе применения активных кондиционеров гармоник и управляемых пофазно источников реактивной мощности, выполненных по технологиям FACTS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
2. Ратнер М.П., Могилевский Е.Л. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. М. : Транспорт, 1985. 295 с.
3. Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Принципы построения систем электроснабжения железных дорог. М. : Теплотехник, 2014. 166 с.
4. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах. Иркутск : ИрГУПС. 2009. 120 с.
5. Крюков А.В., Алексеенко В.А. Повышение эффективности оперативного управления в системах тягового электроснабжения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 4 (32). 2011. С. 158–164.
6. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог / В.П. Закарюкин и др. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2012. 129 с.
7. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Абрамов Н.А. Ситуационное управление режимами систем тягового электроснабжения. Иркутск : Изд-во ИрГУПС. 2010. 123 с.
8. Крюков А.В., Черепанов А.В. Повышение качества электроэнергии в районах электроснабжения нетяговых потребителей, питающихся по линиям «два провода–рельс» // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Т.2. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2013. С. 71–76.
9. Закарюкин, В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. 273 с.
10. 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.
11. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения железных дорог / под ред. А.В. Крюкова. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2016. 170 с.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Системный подход к моделированию многоамперных шинопроводов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 4 (20). С. 68–73.
13. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Соколов В.Ю. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2010. 80 с.
14. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование многопроводных систем с одножильными экранированными кабелями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 16. С. 63–66.
15. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Литвинцев А.И. Интервальный метод расчета режимов электроэнергетических систем в фазных координатах // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 9. С. 54–61.



16. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Моделирование многоамперных шинопроводов // Проблемы энергетики. 2009. № 3–4. С. 65.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Токораспределение в проводах линий электропередачи с расщепленными проводами // Проблемы энергетики. 2010. № 1-2. С. 54.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Моделирование и параметрическая идентификация узлов нагрузки электроэнергетических систем. Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2016. 158 с.
19. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения железных дорог / под ред. А.В. Крюкова: монография. Иркутск : ИрГУПС, 2016. 170 с.
20. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2016. 164 с.

REFERENCES

1. Markvardt K.G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electric supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1982, 528 p.
2. Ratner M.P., Mogilevskii E.L. Elektrosnabzhenie netyagovykh potrebitelei zheleznykh dorog [Electric supply of non-traction railroad consumers]. Moscow: Transport Publ., 1985, 295 p.
3. Bardushko V.D., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Printsipy postroeniya sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Principles of construction of power supply systems for railways]. Moscow: Teplotekhnika Publ., 2014, 166 p.
4. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Modelirovanie elektromagnitnykh vliyaniy na smezhnye LEP na osnove rascheta rezhimov energosistemy v faznykh koordinatakh [Modeling of electromagnetic influences on adjacent transmission lines on the basis of calculation of modes of the power system in phase coordinates]. Irkutsk: ISTU Publ., 2009, 120 p.
5. Kryukov A.V., Alekseenko V.A. Povyshenie effektivnosti operativnogo upravleniya v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya [Operational control efficiency increase in traction power supply systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, No. 4 (32), 2011, pp. 158–164.
6. V.P. Zakaryukin et al. Operativnoe upravlenie v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Operational management in power supply systems of railways]. Irkutsk: ISTU Publ., 2012, 129 p.
7. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Abramov N.A. Situatsionnoe upravlenie rezhimami sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Situational control of modes of traction power supply systems]. Irkutsk: ISTU Publ., 2010, 123 p.
8. Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Povyshenie kachestva elektroenergii v raionakh elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelei, pitayushchikhsya po liniyam «dva provoda–rel's» [Improving the quality of electricity in the areas of electricity supply of non-traction consumers, powered on the lines "two wire and a rail"]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*, Vol.2. Irkutsk: ISTU Publ., 2013, pp. 71–76.
9. Zakaryukin, V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkut. state. un-ty Publ., 2005, 273 p.
10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods of joint modeling of traction and external power supply systems of railways of alternating current]. Irkutsk: ISTU Publ., 2011, 170 p.
11. Kryukov A.V. (ed.). Modelirovanie avariinykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Modeling of emergency modes in power supply systems of railways]. Irkutsk: ISTU Publ., 2016, 170 p.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. Sistemnyi podkhod k modelirovaniyu mnogoampennykh shinoprovodov [The system approach to the simulation of multi-ampere bus bar ducts]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2008, No. 4 (20), pp. 68–73.
13. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Sokolov V.Yu. Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya s moshchnymi tokoprovodami [Modeling of power supply systems with high-power current leads]. Irkutsk: ISTU Publ., 2010, 80 p.
14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie mnogoprovodnykh sistem s odnozhil'nymi ekranirovannymi kabelyami [Modeling multi-wire systems with single-core shielded cables]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2007, No. 16, pp. 63–66.
15. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Litvintsev A.I. Interval'nyi metod rascheta rezhimov elektroenergeticheskikh sistem v faznykh koordinatakh [Interval method of calculating the regimes of electric power systems in phase coordinates]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2011, No. 9, pp. 54–61.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. Modelirovanie mnogoampennykh shinoprovodov [Modeling multi-ampere bus bar ducts]. *Problemy energetiki [Problems of power industry]*, 2009, No. 3–4, p. 65.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Tokoraspreделение v provodakh linii elektroperedachi s rasshcheplyennymi provodami [Current distribution in wires of power transmission lines with split wires]. *Problemy energetiki [Problems of power industry]*, 2010, No. 1-2, p. 54.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Le Kong Zan'. Modelirovanie i parametricheskaya identifikatsiya uzlov nagruzki elektroenergeticheskikh sistem [Modeling and parametric identification of load nodes of electric power systems]. Irkutsk: INRTU Publ., 2016, 158 p.
19. Kryukov A.V. (ed.). Modelirovanie avariinykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Modeling of emergency modes in power supply systems of railways]. Irkutsk: ISTU Publ., 2016, 170 p.
20. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh simmetriruyushchimi transformatorami [Modeling of traction power supply systems equipped with symmetrical transformers]. Irkutsk: ISTU Publ., 2016, 164 p.