



В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. П. Куцкий

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

Дата поступления: 25 февраля 2018 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ОСНАЩЕННЫХ УСТАНОВКАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Аннотация. Выпрямительные электровозы создают существенные гармонические искажения в системах тягового электроснабжения. Из-за наличия высших гармоник возможны перегрузки батарей конденсаторов, которые являются основным элементом источников реактивной мощности, применяемых в тяговом электроснабжении. При повышенных уровнях несинусоидальности такие перегрузки могут привести к выходу источников реактивной мощности из строя, поэтому задача прогнозирования возможных перегрузок имеет практическую значимость. Особую актуальность она приобретает при планировании пропуска поездов повышенной массы.

В статье описана методика компьютерного моделирования, позволяющая определять перегрузку конденсаторных батарей при наличии токов высших гармоник. Задача прогнозирования перегрузок решается с помощью моделирования несинусоидальных режимов системы тягового электроснабжения для планируемых размеров движения применением методов и средств, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения. Моделирование осуществлялось программным комплексом Fazonord для типовой схемы, включающей три межподстанционные зоны тяговой сети 27,5 кВ двухпутного участка. Полученные результаты показали, что защитный реактор позволяет снизить перегрузки источников реактивной мощности до приемлемых значений. При отключении реактора коэффициенты перегрузки становятся недопустимо большими.

Предложенная методика компьютерного моделирования дает возможность определять перегрузки конденсаторных батарей при наличии несинусоидальности кривых токов и напряжений. Применение методики в практике эксплуатации позволит избежать нештатных ситуаций, которые могут приводить к выходу из строя дорогостоящего оборудования.

Ключевые слова: железная дорога, система тягового электроснабжения, переменный ток, конденсаторные батареи, высшие гармоники, перегрузка.

V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov, A. P. Kutsyi

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: February 25, 2018

SIMULATION OF NON-SINUSOIDAL MODES OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS, EQUIPPED WITH REACTIVE POWER COMPENSATION UNITS

Abstract. Rectifying electric locomotives create significant harmonic distortions in tractive electric power supply systems. Because of existence of the higher harmonics, capacitor banks, which are a basic element of reactive power sources applied in power supply systems, can be overloaded. In case of harmonic increased levels such overloads can lead to the total failure of reactive power sources. Therefore, the problem of possible overload prediction has the practical significance. It becomes especially important when planning the passage of trains of increased weight.

The article describes the technique of computer simulation which makes it possible to define the capacitor batteries overload in the presence of higher harmonics currents. It is shown that the problem of overload prediction can be solved by the non-sinusoidal mode simulation for the planned amount of train traffic using the methods and means developed at Irkutsk State Transport University. The simulation was carried out by the software package Fazonord for the standard tractive power supply system including three intersubstation zones of 27.5 kV tractive network of the two-track section. The results showed that overloads of capacitor banks can be lowered to acceptable values by means of the protective reactor. When the reactor is shut down, overload coefficients become unacceptably large.

The offered technique of computer simulation gives the chance to define capacitor batteries' overloads in the presence of non-sinusoidal curve currents and voltages. Practical application of the technique will allow avoiding emergency situations which can lead to failure of the expensive equipment.

Keywords: railroad, tractive electric power supply system, alternating current, capacitor batteries, the higher harmonics, overload.

Введение

Источники реактивной мощности (ИРМ), выполненные на основе конденсаторных батарей (КБ), являются эффективным средством улучшения качества электрической энергии в системах

тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог переменного тока [1–9]. Из-за наличия в СТЭ существенных гармонических искажений, которые создают выпрямительные электровозы, возможны перегрузки КБ токами высших гармоник (ВГ). При



значительных уровнях несинусоидальности такие перегрузки могут привести к выходу из строя ИРМ [10], поэтому задача прогнозирования возможных перегрузок имеет практическую значимость. Особую актуальность она приобретает при планировании пропуска поездов повышенной массы [11–13].

Методика моделирования

Задача прогнозирования перегрузок ИРМ может быть решена с помощью моделирования несинусоидальных режимов СТЭ для планируемых размеров движения на основе методов и средств, разработанных в ИрГУПСе.

Способы адекватного моделирования внешней сети и СТЭ, учитывающие электромагнитные взаимодействия и позволяющие объединять СТЭ, СВЭ и РЭС в единую систему, предложены в работах [14, 15]. Переход к имитационному моделированию потребовал разработки алгоритмов формирования отдельных мгновенных схем, определяемых перемещением поездов, и формирования интегральных характеристик моделирования.

Методика моделирования реализована в виде программного комплекса (ПК) Fazonord, который предназначен для определения совокупности режимов мгновенных схем СТЭ переменного тока, отвечающих размещению поездов в пространстве в дискретные моменты времени. На основе ПК возможно выполнять моделирование режимов СТЭ на основной частоте и частотах высших гармоник, которые генерируются электровозами, а также стационарными источниками несинусоидальности. При создании расчетных моделей применяются визуальные компоненты, отвечающие элементам СТЭ и питающей электроэнергетической системы. К таким элементам относятся кабельные и воздушные ЛЭП, тяговые сети, трансформаторы, имеющие различные соединения обмоток, узлы нагрузки и др.

С помощью ПК можно осуществлять следующие операции:

- формирование моделей элементов с использованием встроенного редактора, а также их сохранение в базе данных;
- составление из сформированных элементов расчетных схем, используя удобный графический интерфейс;
- выделение элементов, отвечающих контактной сети (КС), осуществление их привязки к узлам КС и формирование на этой основе маршрута движения поезда;
- формирование наборов мгновенных схем, отвечающих заданному графику движения;

- определение величин мощностей перемещающихся нагрузок по данным тяговых расчетов;
- определение режимов ряда мгновенных схем по рассматриваемому графику движения;

– проведение расчетов наведенных напряжений, возникающих на линиях электропередачи и связи, проложенных вдоль трассы железной дороги (ЖД); при этом возможно моделирование параллельного и косоугольного сближения трасс ЖД и линий;

– представление результатов моделирования в виде графиков, таблиц и векторных диаграмм.

Основное отличие ПК Fazonord от аналогичных программных продуктов состоит в возможности проведения полнофункционального моделирования элементов СТЭ и электроэнергетических систем в фазных координатах с учетом электромагнитных связей. Кроме того, с помощью этого ПК можно анализировать динамику изменения режима в объединенной системе внешнего и тягового электроснабжения, а также определять показатели качества электрической энергии при движении поездов.

В статье рассмотрено применение ПК Fazonord для моделирования несинусоидальных режимов СТЭ с целью определения возможных перегрузок КБ токами высших гармоник. По результатам моделирования несинусоидальных режимов рассчитываются коэффициенты перегрузки ИРМ

$$k_p = \frac{1}{I_{\text{НОМ}}} \sqrt{\sum_{k=1}^{40} (I_k)^2},$$

где I_k – ток гармоники с номером k . Величина k_p , превышающая 1,3, как правило, отвечает недопустимой перегрузке [10].

Результаты моделирования

Моделирование проводилось для типовой схемы СТЭ, включающей три межподстанционные зоны (МПЗ) тяговой сети 27,5 кВ двухпутного участка. Протяженность каждой МПЗ равнялась 50 км. Питание МПЗ производилось четырьмя трансформаторами ТДТНЖ-40000/230/27,5. На посту секционирования средней МПЗ для каждого пути установлены конденсаторные батареи с защитными реакторами. Сопrotивление КБ $X_C = -209$ Ом, реактора $j26,1$ Ом. Номинальный ток КБ 150 А. Рассматривалось движение десяти четных и десяти нечетных поездов массами 5000 т с интервалами движения 35 минут (рис. 1). Токoвые профили поездов показаны на рис. 2.

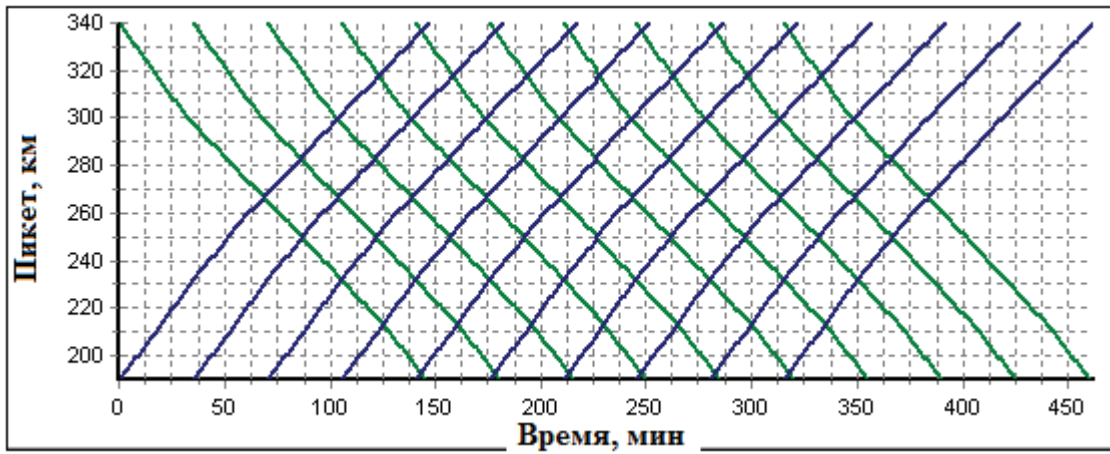
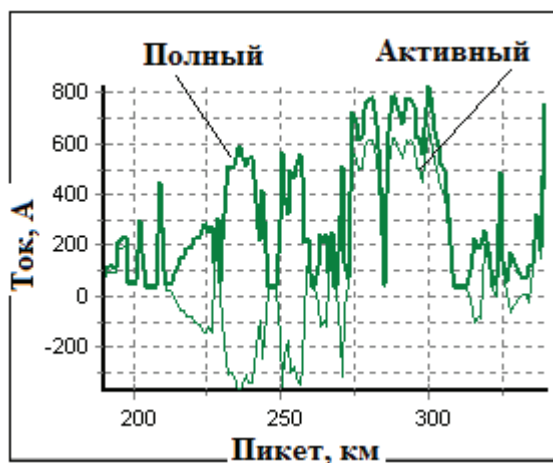


Рис. 1. График движения поездов



а)



б)

Рис. 2. Токвый профиль нечетного поезда (а) и четного поезда (б)

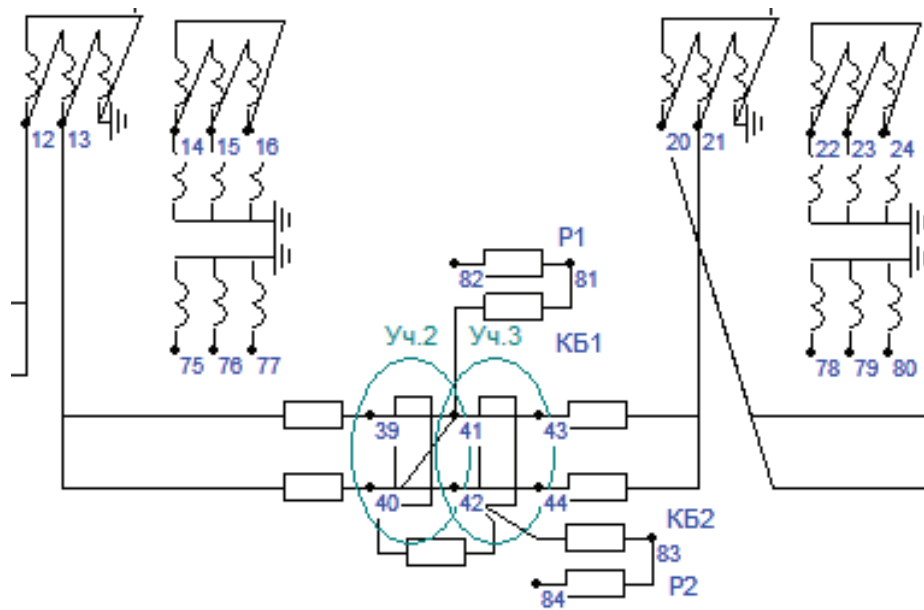


Рис. 3. Фрагмент расчетной схемы

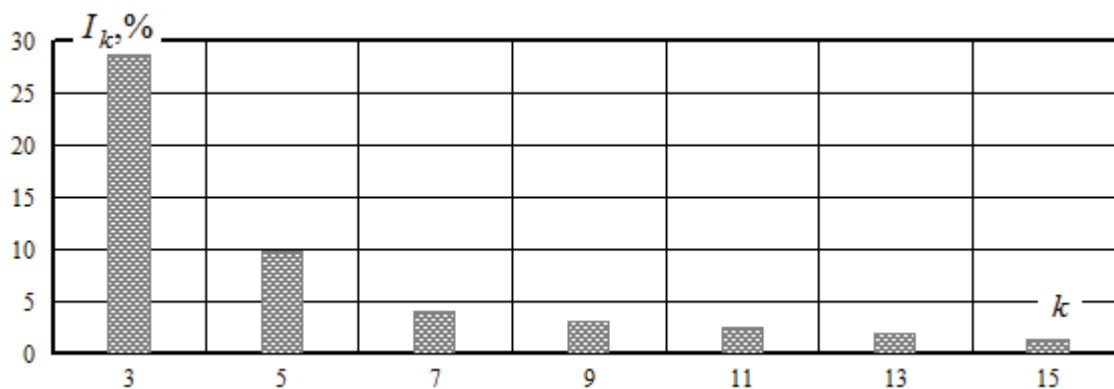


Рис. 4. Спектр гармоник электровоза

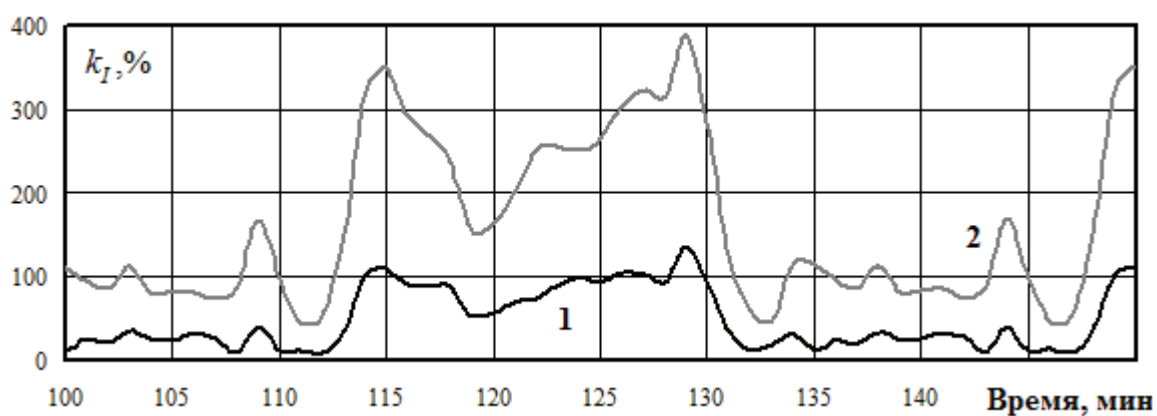


Рис. 5. Суммарные коэффициенты гармоник тока КБ1:

1 – реакторы включены; 2 – реакторы отключены

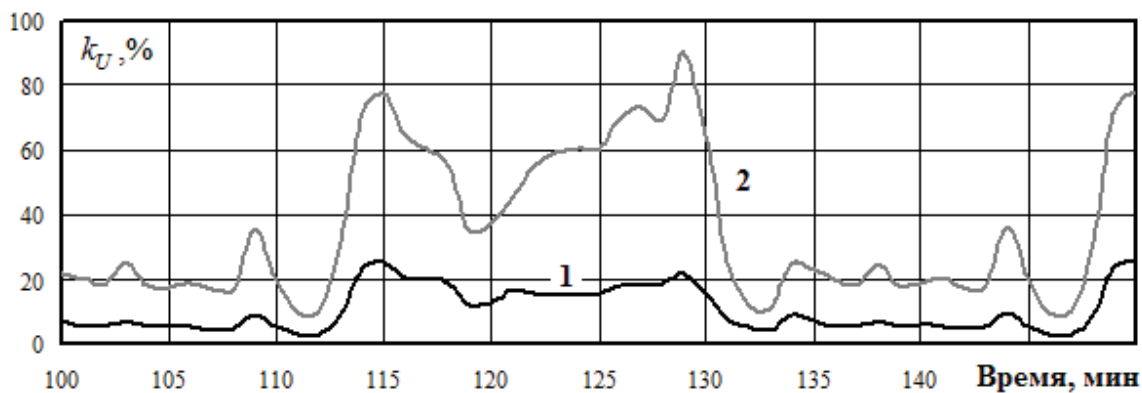


Рис. 6. Суммарные коэффициенты гармоник напряжения КБ1:

1 – реакторы включены; 2 – реакторы отключены

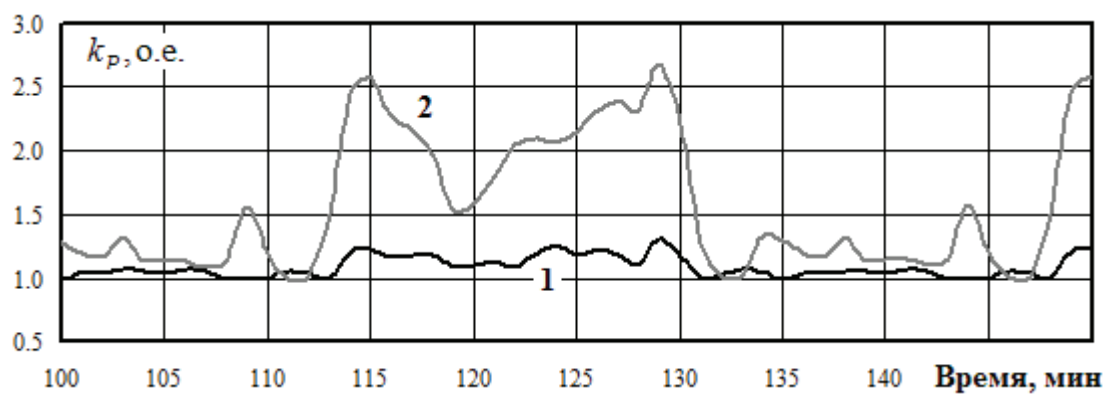


Рис. 7. Коэффициенты перегрузки конденсаторной батареи КБ1:

1 – реакторы включены; 2 – реакторы отключены



Таблица 1

Сводные данные

Параметр	Показатель	Режим		Различие, %
		Реактор включен	Реактор отключен	
I_1, A	Максимум	164	143	-13
	Среднее значение	146	127	-13
$k_I, \%$	Максимум	137	388	184
	Среднее значение	44,2	137	209
$k_U, \%$	Максимум	25,6	90	252
	Среднее значение	9,1	31,9	239
I_{Σ}, A	Максимум	200	401	101
	Среднее значение	165	221	34
$k_P, o.e.$	Максимум	1,30	2,70	101
	Среднее значение	1,10	1,47	34

Примечания: I_1 – ток основной частоты; k_I, k_U – коэффициенты гармоник тока и напряжения; I_{Σ} – эффективное значение тока с учетом высших гармоник.

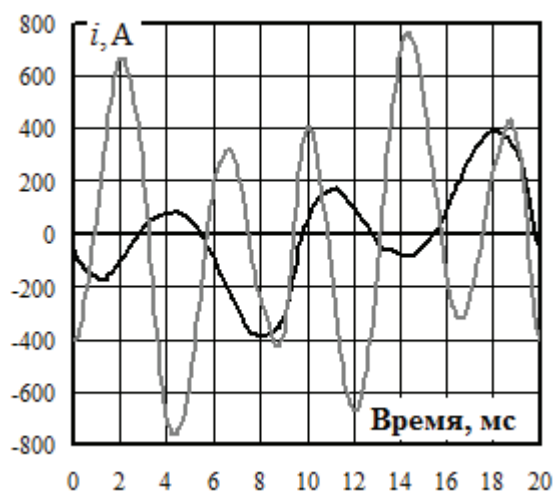


Рис. 8. Формы кривых тока и напряжения КБ1: а – напряжение; б – ток

Фрагмент расчетной схемы со средней МПЗ и двумя ИРМ показан на рис. 3. Гармонический состав тока электровоза приведен на рис. 4. Моделирование проводилось для двух вариантов:

- при включенном защитном реакторе, представленным RL-элементом с сопротивлением $Z_L = 0,43 + j26,1 \text{ Ом}$;
- при отключенном реакторе.

Результаты моделирования в виде временных зависимостей показателей, характеризующих режимы ИРМ и величину их перегрузки, представлены на рис. 5–12 и в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что защитный реактор снижает коэффициент перегрузки до приемлемых величин. При его отключении значения k_P становятся недопустимо большими. Формы кривых тока и напряжения при отключенных реакторах более существенно отличаются от синусоиды, чем в ситуации, когда реакторы включены.

Коэффициент перегрузки связан практически линейной зависимостью с коэффициентом гармоник тока; при включенном реакторе из-за более сложных электромагнитных процессов наблюдается заметный разброс расчетных точек зависимости $k_P = k_P(k_I)$ от линии регрессии (рис. 9). Символом r на рис. 9 обозначен коэффициент корреляции.

Для более детального рассмотрения процессов перегрузки батарей токами высших гармоник на рис. 10–12 представлены следующие временные зависимости:

$$I_1 = I_1(t); I_{ef}^{(hg)} = I_{ef}^{(hg)}(t); I_{\Sigma} = I_{\Sigma}(t), \quad (1)$$

где $I_{ef}^{(hg)} = \sqrt{\sum_{h=3}^{40} I_h^2}$ – эффективные токи высших гармоник.

Величины, входящие в выражения (1), связаны следующими соотношениями:

$$I_{ef}^{(hg)} = k_I I_1; I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + k_I^2}.$$

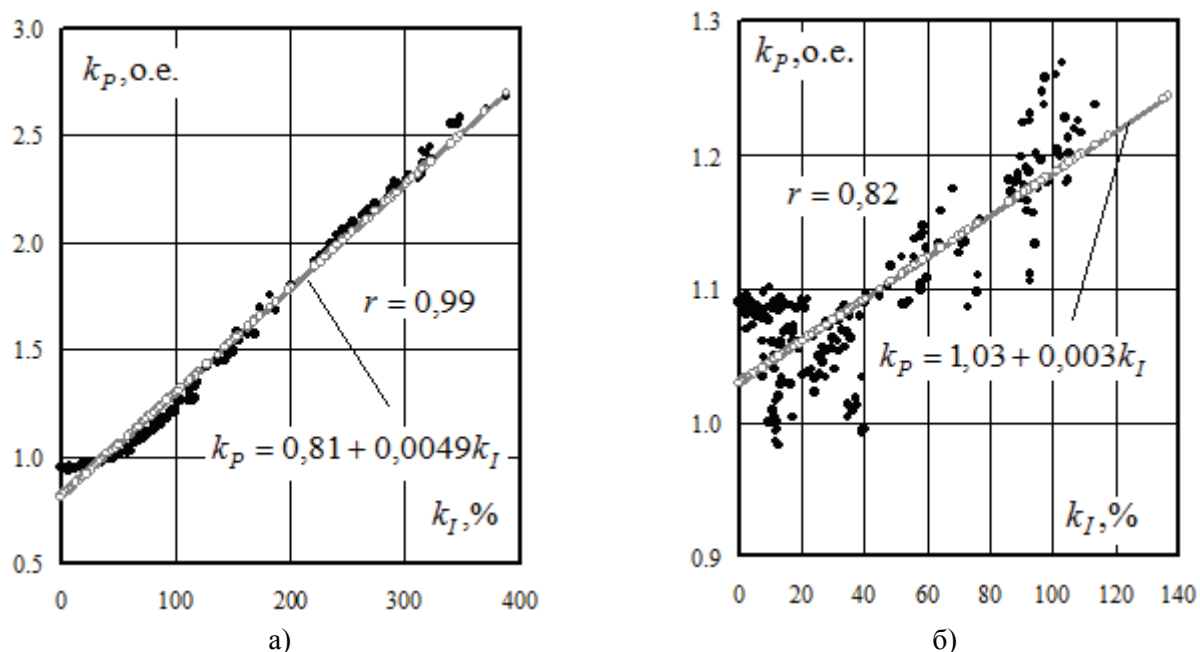


Рис. 9. Зависимость коэффициентов перегрузки от суммарного коэффициента гармоник тока при отключенных реакторах (а) и при включенных реакторах (б)

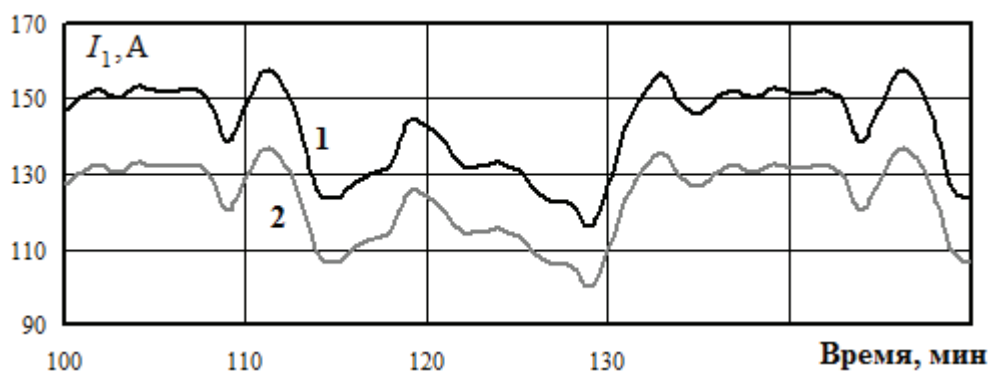


Рис. 10. Токи основной частоты, протекающие в цепи ИРМ:
1 – реакторы включены; 2 – реакторы отключены

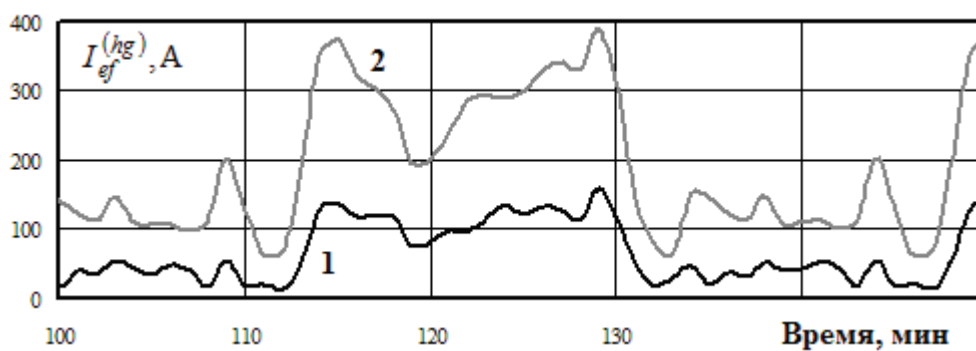


Рис. 11. Эффективные токи ВГ, протекающие в цепи ИРМ:
1 – реакторы включены; 2 – реакторы отключены

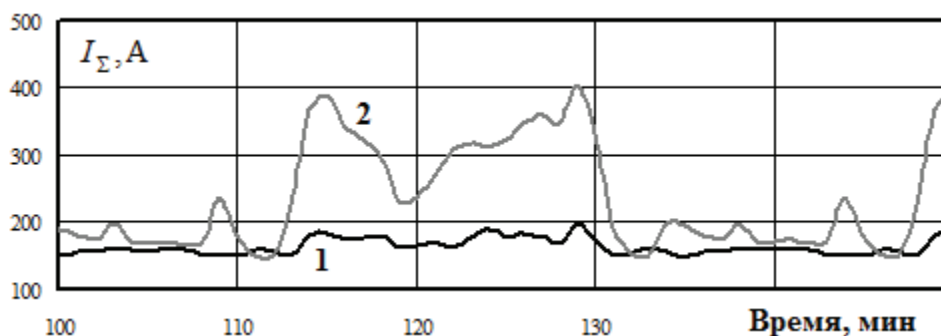


Рис. 12. Результирующие эффективные токи:

1 – реакторы включены; 2 – реакторы отключены

Из рис. 10-12 видно, что при включенных реакторах из-за уменьшения результирующего сопротивления цепи ИРМ токи основной частоты увеличиваются примерно на 13 %. Эффективные токи ВГ, протекающие в цепи ИРМ, существенно снижаются, что определяется ростом результирующего сопротивления с увеличением частоты. Снижение токов $I_{ef}^{(hg)}$ приводит к заметному уменьшению эффективных токов I_{Σ} ; при этом ко-

эффициенты перегрузки батарей не выходят за допустимые пределы.

Заключение

Предложенная методика компьютерного моделирования дает возможность определения перегрузки конденсаторных батарей токами высших гармоник. Применение методики в практике эксплуатации позволит избежать нештатных ситуаций, которые могут приводить к выходу из строя дорогостоящего оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1983. 183 с.
2. Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М. : Моск. гос. ун-т путей сообщ., 2014. 173 с.
3. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2013. 315 с.
4. Герман Л. А., Серебряков А. С., Дулепов Д. Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог. Княгинино : НГИЭУ, 2017. 402 с.
5. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Управление качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск : ИрГУПС, 2015. 180 с.
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future. Proceeding. № 2. Magdeburg : Otto-von-Guericke University Magdeburg, 2013. P. 44–48.
8. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrierlag, 2008. 334 p.
9. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
10. Скамьин А.Н. Повышение эффективности функционирования конденсаторных батарей в электрической сети горного предприятия // Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 107–110.
11. Пехтерев Ф. С. Перспективные полигоны обращения тяжеловесных поездов // Железнодорожный транспорт. 2014. № 9. С. 7–10.
12. Курбасов А. С. Тяжеловесное движение грузовых поездов на российских железных дорогах: за и против // Наука и транспорт. 2012. № 3. С. 15–17.
13. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения при движении тяжеловесных поездов // Вестник ИрГТУ. 2016. Т.20. № 11. С. 133–142.
14. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-т, 2005. 273 с.
15. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2011. 170 с.

REFERENCES

1. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Condenser installations of electrified railways]. Moscow : Transport Publ., 1983, 183 p.
2. German L.A., German V.L. Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoi seti peremennogo toka [Automation of power supply of an AC traction network]. Moscow : Mosc. State Transport Un-ty, 2014, 173 p.



3. German L.A., Serebryakov A.S. Reguliruemye ustanovki emkostnoi kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Adjustable installations of capacitive compensation in traction power systems of railways]. Moscow : Training and methodological center for education in railway transport, 2013, 315 p.
4. German L. A., Serebryakov A. S., Dulepov D. E. Fil'trokompensiruyushchie ustanovki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Compensation filter installations in traction power systems of railways]. Knyaginino : NGIEU Publ., 2017, 402 p.
5. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electricity supply of electrified railways]. Moscow : Transport Publ., 1982, 528 p.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Upravlenie kachestvom elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Electricity quality management in power supply systems of railways]. Irkutsk : ISTU Publ., 2015, 180 p.
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System. *The power grid of the future. Proceeding*, No. 2. Magdeburg : Otto-von-Guericke University Magdeburg, 2013, pp. 44–48.
8. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008, 334 p.
9. Biesenack H., Braun E., George G., et al. Energieversorgung elektrischer bannen. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag, 2006, 732 p.
10. Skam'in A.N. Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya kondensatornykh batarei v elektricheskoi seti gornogo pred-priyatiya [Increase of efficiency of functioning of capacitor batteries in electric network of mining enterprise]. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 2011, Vol. 189, pp. 107–110.
11. Pekhterev F. S. Perspektivnye poligony obrashcheniya tyazhelovesnykh poezdov [Perspective polygons of heavy-train handling]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway Transport]*, 2014, No. 9, pp. 7–10.
12. Kurbasov A. S. Tyazhelovesnoe dvizhenie gruzovykh poezdov na rossiiskikh zheleznykh dorogakh: za i protiv [Heavy traffic of freight trains on the Russian railways: pros and cons]. *Nauka i transport [Railway transport]*, 2012, No. 3, pp. 15–17.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Modelirovanie rezhimov sistem tyagovogo elektrosnabzheniya pri dvizhenii tyazhelovesnykh poezdov [Modeling of modes of traction power supply systems during the movement of heavy trains]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2016, Vol.20, No. 11, pp. 133–142.
14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh system [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk : Irkut. state un-ty Publ., 2005, 273 p.
15. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Metody sovmeznogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods of joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk : ISTU Publ., 2011, 170 p.

Информация об авторах

Authors

Закарюкин Василий Пантелеймонович - д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич - д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Куцый Антон Павлович - аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tosha1993irk@yandex.ru

Vasilii Panteleimonovich Zakaryukin – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: zakar49@mail.ru

Andrei Vasilievich Kryukov – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Anton Pavlovich Kutsyi – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tosha1993irk@yandex.ru

Для цитирования

For citation

Закарюкин В. П. Моделирование несинусоидальных режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками компенсации реактивной мощности / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. П. Куцый // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 57, № 1. - С. 72-79. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).72-79.

Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kutsyi A.P. Simulation of non-sinusoidal modes of traction power supply systems, equipped with reactive power compensation units. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 57, No. 1, pp. 72-79. DOI: 10.26731 / 1813-9108.2018.1 (57). 72-79

УДК 656.259

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).79-89

А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов

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

Дата поступления: 12 февраля 2018 г.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Аннотация. На основе системного анализа устойчивости работы автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) рассмотрены эксплуатационно-технические требования к кодам АЛС. Проведен анализ причин сбоев в работе системы АЛС, структурно представленной в виде трех функциональных блоков – передающих путевых устройств, линии связи и приемных