



А. В. Крюков^{1,2}, А. В. Черепанов¹, А. Р. Шафиков¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 20 сентября 2018 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЛОКОМОТИВОВ С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Аннотация. Выпрямительные электровозы обладают нелинейными вольт-амперными характеристиками и генерируют в питающие сети высшие гармоники (ВГ), 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.

Уровень генерации ВГ зависит от конструктивных особенностей электровозов. Электроподвижной состав с зонно-фазовым регулированием создает большие гармонические искажения; при этом возрастают потери мощности в тяговой сети и снижается надежность электроснабжения. Электровозы нового поколения, оснащенные асинхронными двигателями (АЭД) и 4q-S-преобразователями, позволяют формировать кривую тока, близкую к синусоидальной, и уменьшают гармонические искажения.

Для количественной оценки степени уменьшения гармонических искажений при движении локомотивов с АЭД проведено имитационное моделирование несинусоидальных режимов типовой системы тягового электроснабжения 25 кВ для двух вариантов используемых локомотивов: ВЛ-80Р с зонно-фазовым регулированием; УТУ-1 с асинхронными двигателями и четырехквadrантными преобразователями.

В основу методики определения несинусоидальных режимов положена технология моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах с применением решетчатых схем с полносвязной топологией. Такие схемы построены с использованием элементов с параметрами, зависящими от частоты. Поэтому они могут быть достаточно просто пересчитаны на частоты ВГ. Зависимости от текущего режима параметров, характеризующих источники гармоник, не оказывают существенного влияния на результаты расчетов. Это связано с тем, что первая гармоника является доминирующей и параметры источников определяются путем предварительного расчета режима на основной частоте. Предложенный подход обладает универсальностью и может быть использован для исследования несинусоидальных режимов в специфических и перспективных системах тягового электроснабжения.

Результаты моделирования показали, что проблема повышенного уровня гармонических искажений в сетях, питающих тяговые подстанции, может быть полностью решена при замене существующих локомотивов на электровозы нового поколения с асинхронными электроприводами и четырехквadrантными преобразователями.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, несинусоидальные режимы, электровозы нового поколения с асинхронными электроприводами и четырехквadrантными преобразователями.

А. В. Крюков^{1,2}, А. В. Черепанов², А. Р. Шафиков²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: September 20, 2018

THE MODELLING OF NONSINUSOIDAL MODES IN THE RAILROAD POWER SUPPLY SYSTEMS WHEN DRIVING LOCOMOTIVES WITH INDUCTION TRACTION MOTORS

Abstract. Rectifier electric locomotives have nonlinear current voltage characteristics and generate the upper harmonics (UH) in power lines, which is accompanied by the following negative effects: equipment life decrease, 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 UH generation level depends on the design features of electric locomotives. The electric rolling stock with zonal and phase regulation creates larger harmonic distortions; at the same time power losses in the traction network increase, and power indicators of substations and the system of external power supply worsen. The electric locomotives of new generation, equipped with induction motors (IM) and converters with pulse management, allow forming almost sinusoidal curve of current, reducing loading of networks jet energy and reducing harmonic distortions.

To quantify the extent of decrease of harmonic distortions during the movement of locomotives with IM, the simulation modelling of the nonsinusoidal modes of the standard 25 kV traction power supply system was carried out for two options of the used locomotives: VL-80R with zonal and phase regulation; UTY-1 with induction motors and four-quadrant converters.



The technology of model operation of electrical power systems in phase coordinates with use of trellised circuits from the RLC elements with the full-connected topology is the basis for a technique of defining the modes by the upper harmonics. Trellised schemes are frequency-dependent and are rather just recalculated for frequencies of the upper harmonics. The dependencies of parameters of nonlinear sources on the current mode have no significant effect on calculation. This is due to the fact that the first harmonica is dominating and the parameters of sources are determined on the basis of the mode predesign at the base frequency. The offered approach is versatile and can be used for a research of the nonsinusoidal modes in the specific and advanced systems of traction power supply.

Results of the modelling showed that the problem of the increased level of harmonic distortions in the networks feeding traction substations can be completely solved when replacing of the existing locomotives by electric locomotives of new generation with asynchronous electric drives and four-quadrant converters.

Keywords: power supply systems of the railroads, nonsinusoidal mode, electric locomotives of new generation with asynchronous electric drives and four-quadrant converters.

Введение

Выпрямительные электровозы имеют нелинейные вольтамперные характеристики и генерируют высшие гармоники (ВГ), которые могут проникать во внешние сети и районы электроснабжения нетяговых потребителей [1]. Протекание токов ВГ сопровождается следующими негативными эффектами [2–16]:

- дополнительный нагрев изоляции обмоток трансформаторов, приводящий к сокращению срока их службы;
- ускоренное тепловое старение изоляции обмоток статора асинхронных электродвигателей (АЭД);
- возникновение дополнительной погрешности измерения электроэнергии; она может привести к результирующей погрешности, превышающей допустимые значения;
- обрыв нейтрального провода вследствие отгорания контакта при значительном уровне гармоник с номерами, кратными трем; это может привести к выходу из строя отдельных электроприемников из-за появления повышенных напряжений на их зажимах;
- резонансные эффекты на частотах высших гармоник, создающие серьезные проблемы для электрооборудования.

Поэтому задача снижения уровней гармонических искажений в сетях, примыкающих к тяговым подстанциям (ТП) железных дорог переменного тока, имеет повышенную актуальность.

Уровень генерации ВГ зависит от конструктивных особенностей электровозов. Для иллюстрации этого положения на рис. 1–3 представлены спектры гармоник электровозов ВЛ-80Р с зонно-фазовым регулированием и УТУ-1 нового поколения с асинхронными двигателями и четырехквadrантными преобразователями [17].

Электроподвижной состав (ЭПС) с зонно-фазовым регулированием создает значительные гармонические искажения; при этом увеличивают-

ся потери мощности в тяговой сети (ТС), что приводит к дополнительным нагревам оборудования и ухудшению энергетических показателей.

Электровозы нового поколения, оснащенные преобразователями с импульсным управлением, позволяют формировать почти синусоидальную кривую тока, снижают загрузку сетей реактивной энергией и уменьшают гармонические искажения. Это способствует повышению энергетической эффективности ТС.

Для количественной оценки степени уменьшения гармонических искажений напряжения при движении локомотивов с АЭД проведено имитационное моделирование несинусоидальных режимов типовой системы тягового электроснабжения 25 кВ для двух вариантов используемых локомотивов: ВЛ-80Р с зонно-фазовым регулированием; УТУ-1 с асинхронными двигателями и четырехквadrантными преобразователями.

Методика моделирования

В основу методики определения несинусоидальных режимов положена технология моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС) в фазных координатах с применением решетчатых схем с полносвязной топологией [18–20]. Такие схемы построены с использованием элементов с параметрами, зависящими от частоты. Поэтому они могут быть достаточно просто пересчитаны на частоты ВГ. Зависимости от текущего режима параметров, характеризующих источники гармоник, не оказывают существенного влияния на результаты расчетов. Это связано с тем, что первая гармоника является доминирующей и параметры источников определяются путем предварительного расчета режима на основной частоте.

Для воздушных и кабельных линий при расчетах на частотах ВГ достаточно задать частоту, которая является общим расчетным параметром. Для трансформаторов требуется дополнительно выполнять корректировку некоторых параметров.

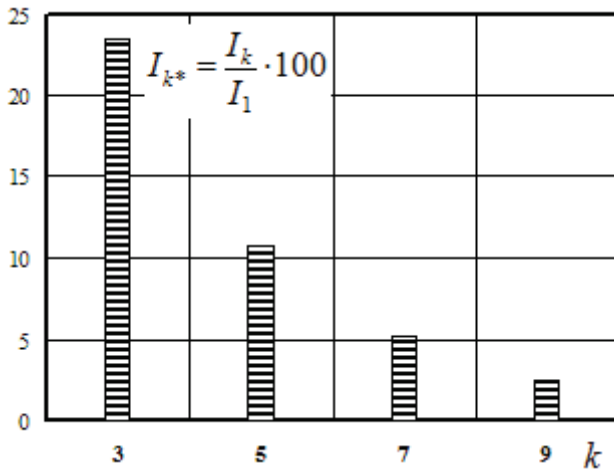


Рис. 1. Спектр тока электроваз ВЛ-80Р

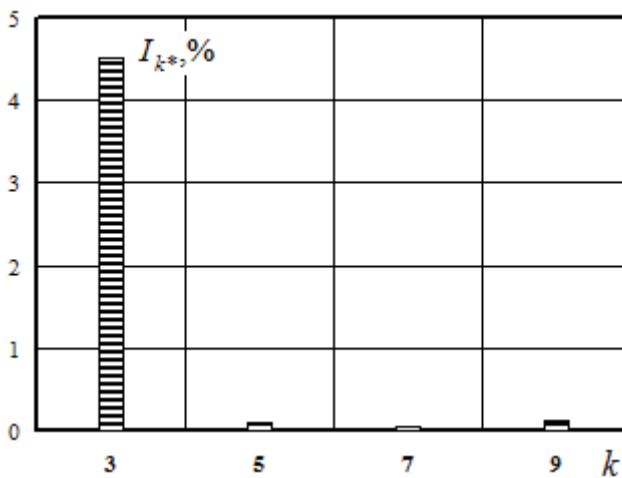


Рис. 2. Спектр тока электроваз UTU-1

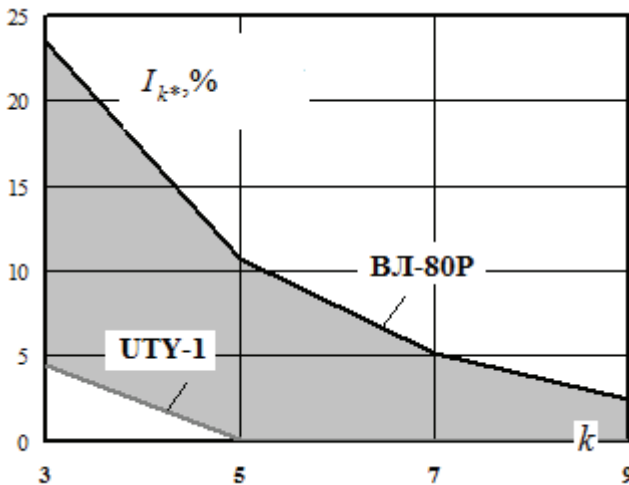


Рис. 3. Сравнение спектров ВЛ-80Р и UTU-1

Задача моделирования несинусоидальных режимов сводится к решению следующих систем линейных и нелинейных уравнений [20]:

$$\mathbf{F}[\mathbf{X}(f_1)] = \mathbf{0};$$

$$\mathbf{Y}(f_2)\dot{\mathbf{U}}(f_2) = \mathbf{i}(f_2);$$

$$\mathbf{Y}(f_3)\dot{\mathbf{U}}(f_3) = \mathbf{i}(f_3);$$

$$\dots$$

$$\mathbf{Y}(f_{40})\dot{\mathbf{U}}(f_{40}) = \mathbf{i}(f_{40}),$$

где f_i – частоты высших гармоник, $i = 2, 3, \dots, 40$; $f_i = if$, $f = 50$ Гц; $\mathbf{Y}(f_i)$ – матрица проводимостей расчетной модели ЭС, сформированная для частоты f_i ; $\dot{\mathbf{U}}(f_i)$ – искомые напряжения в узловых точках сети; $\mathbf{i}(f_i)$ – вектор токов источников ВГ.

Для получения решетчатой схемы замещения на частоте ВГ параметры короткого замыкания и холостого хода трансформаторов нельзя использовать напрямую. Реактивные сопротивления рассеяния, определенные для основной частоты, можно пересчитать на частоты ВГ. Корректировку потерь короткого замыкания можно провести пропорционально частоте гармоники. Корректировку потерь холостого хода выполнять нецелесообразно, потому что с увеличением ω снижается индукция в магнитопроводе, что приводит к уменьшению потерь в сердечнике.

При расчетах на ВГ используется одна из схем для нагрузок, предложенных в работе [8], – параллельная с сопротивлениями элементов, которые определяются по формулам

$$R_p = \frac{U^2}{P}; \quad X_p = \frac{\nu U^2}{Q},$$

где U – действующее значение напряжения основной частоты, ν – номер гармоники.

Стационарные источники гармоник задаются двумя способами:

- приближенное вычисление амплитуд гармоник по формуле работы [8]

$$I_\nu = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi k_T \nu},$$

где $\nu = kp \pm 1$ – номера гармоник; $p = 6, 12$ или 24 – число пульсаций преобразователя, $k = 1, 2, 3, \dots$; при $p = 2$ (однофазный выпрямитель) амплитуды гармоник находятся по выражению

$$I_\nu = \frac{4I_d}{\pi k_T \nu},$$

где I_d – величина выпрямленного тока, определяемая через заданное значение основной гармоники тока, а фазы гармоник находятся через начальную фазу тока основной частоты по формуле $\psi_\nu = \nu\psi$;

- «ручное» заполнение таблицы гармоник пользователем; при этом в процессе расчета к начальной фазе тока основной частоты добавляется угловой сдвиг, указанный в таблице гармоник.

Расчеты проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 до 40-й гармоники. Для определения форм кривых напряжения и тока производится суммирование ряда Фурье



$$u(t) = \sum_{k=1}^{41} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega t + \psi_k)$$

с использованием вычисления синусов и косинусов кратных аргументов по следующему алгоритму.

В течение периода (20 мс) вычисляется 100 значений напряжения или тока через 0,01 периода. В каждой i -й точке по времени для каждой гармоники k аргументы синуса и косинуса кратны исходным значениям синуса и косинуса:

$$u_i = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{41} U_k \sin(ik\omega\Delta t + \psi_k) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{41} U_k \sin(ik\theta + \psi_k);$$

$$u_i = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{41} [U_k \sin(ik\theta) \cos \psi_k + \cos(ik\theta) \sin \psi_k];$$

$$\theta = 0,062832 \text{ рад.}$$

В нулевой момент времени $u_0 = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{41} U_k \sin \psi_k$ и на первом шаге вычисляются все значения $S_k = \sin \psi_k$, $C_k = \cos \psi_k$.

На втором шаге алгоритма определяется величина напряжения первого момента времени:

$$u_1 = \sqrt{2} \{ U_1 (C_1 S_\Delta + S_1 C_\Delta) + \dots + U_k [C_k \sin(k\theta) + S_k \cos(k\theta)] + U_{k+1} [C_{k+1} \sin(k+1)\theta + S_{k+1} \cos(k+1)\theta] + \dots + U_{41} [C_{41} \sin(41\theta) + S_{41} \cos(41\theta)] \},$$

где в соответствии с требованиями стандартов учитывается 40 гармоник и обозначено $S_\Delta = \sin \theta = 0,062791$, $C_\Delta = \cos \theta = 0,9980267$.

Для $(i + 1)$ -го момента времени используются результаты для предыдущего момента:

$$u_{i+1} = \sqrt{2} \{ U_1 [C_1 \sin(i+1)\theta + S_1 \cos(i+1)\theta] + \dots + U_k [C_k \sin(i+1)k\theta + S_k \cos(i+1)k\theta] + U_{41} [C_{41} \sin 41(i+1)\theta + S_{41} \cos 41(i+1)\theta] \};$$

$$\sin(i+1)k\theta = \cos k\theta \sin ik\theta + \sin k\theta \cos ik\theta,$$

$$\cos(i+1)k\theta = \cos k\theta \cos ik\theta - \sin k\theta \sin ik\theta.$$

Результаты моделирования

Моделирование осуществлялось программным комплексом Fazonord для типовой системы тягового электроснабжения 25 кВ (рис. 4). Рассматривался двухпутный участок железной дороги протяженностью 120 км. Система тягового электроснабжения включала три межподстанционные зоны длиной в 40 км.

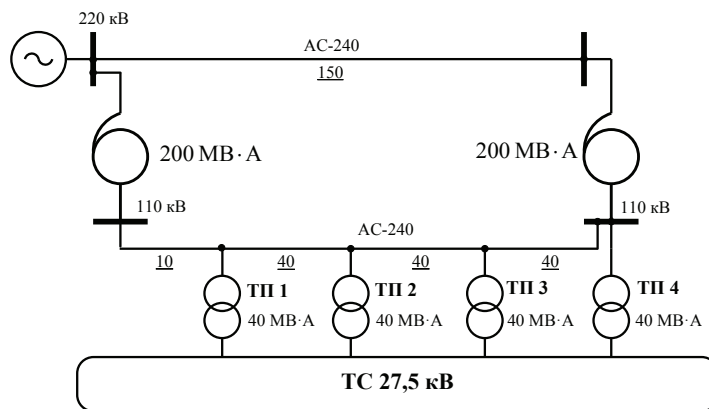


Рис. 4. Схема СЭЖД

Моделирование проведено при движении четырех грузовых поездов массой 6384 т в четном и нечетном направлениях для двух вариантов:

- 1) для перемещения поездов используются локомотивы ВЛ-80Р с зонно-фазовым регулированием;
- 2) используются локомотивы УТУ-1 нового поколения с асинхронными двигателями и четырехквadrантными преобразователями [17].

Фрагмент схемы расчетной модели представлен на рис. 5. Принципиальные схемы ЭПС показаны на рис. 6. График движения поездов приведен на рис. 7, а токовые профили поездов – на рис. 8. Показатели несинусоидальности определялись на шинах 110 кВ тяговой подстанции номер 4.

Результаты моделирования сведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 9, 10.

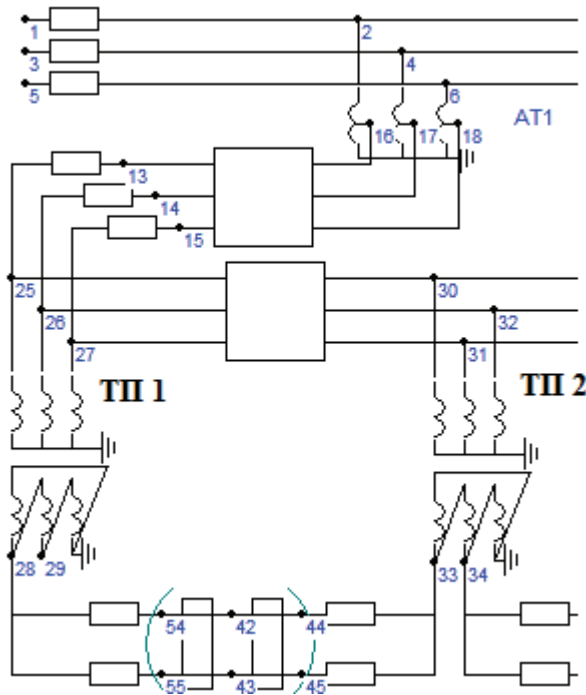
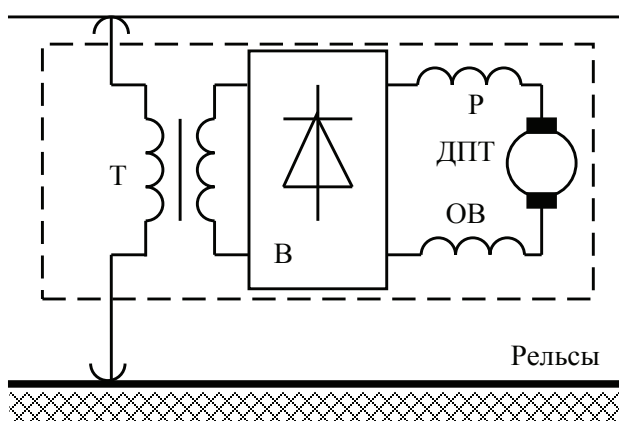
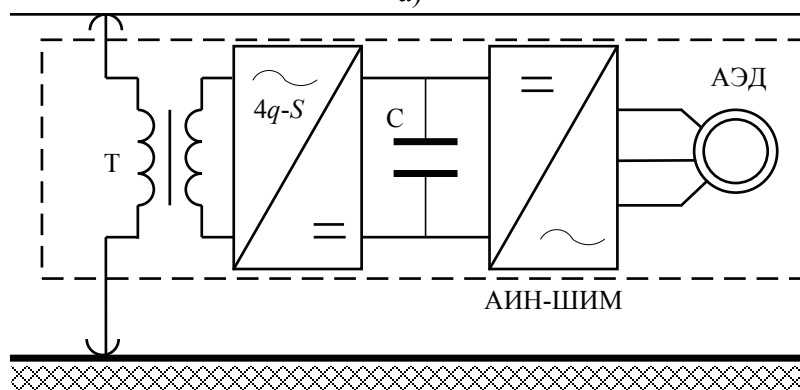


Рис. 5. Фрагмент схемы расчетной модели

Контактная сеть



а)



б)

Рис. 6. Схемы ЭПС [17]:

a – ВЛ-80Р; *б* – УТУ-1; Т – трансформатор; В – выпрямительная установка;

Р – сглаживающий реактор; ДПТ – тяговый двигатель постоянного тока; АЭД – асинхронный тяговый двигатель; АИН-ШИМ – автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией; 4*q*-*S* – четырехквadrантный преобразователь; С – конденсаторный фильтр

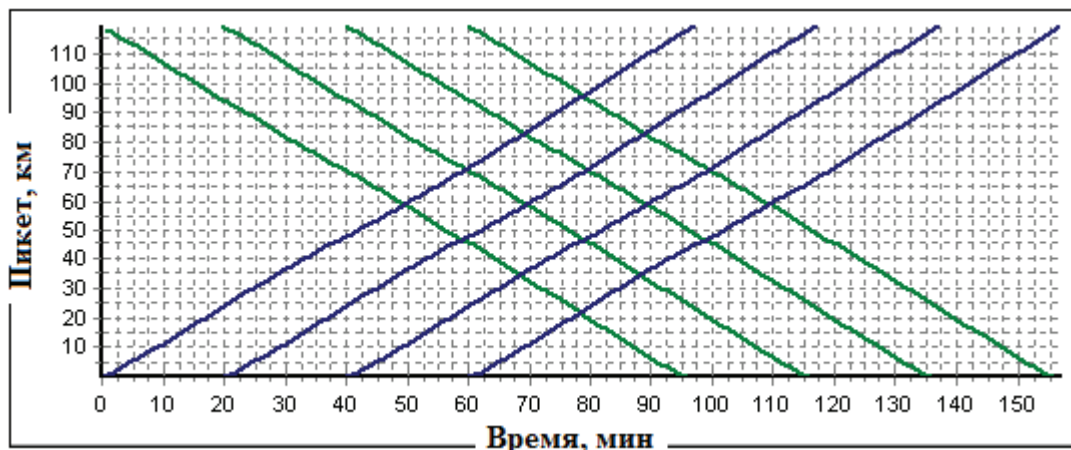
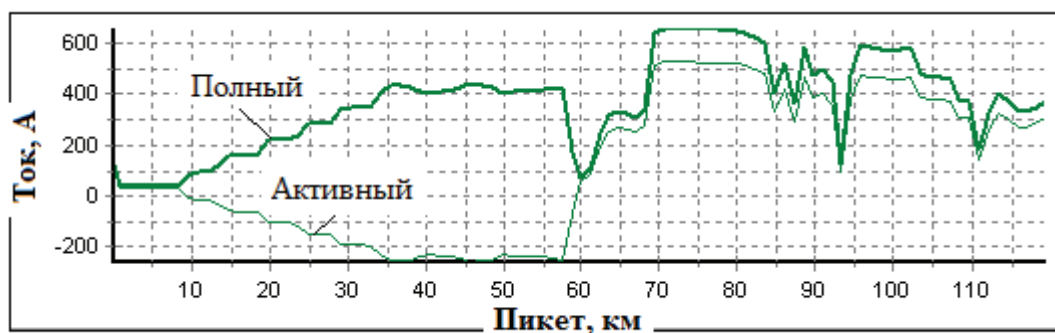
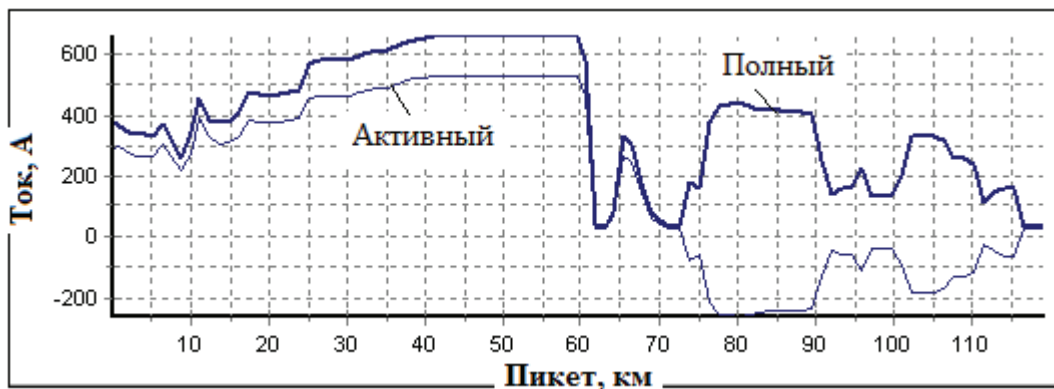


Рис. 7. График движения поездов



а)



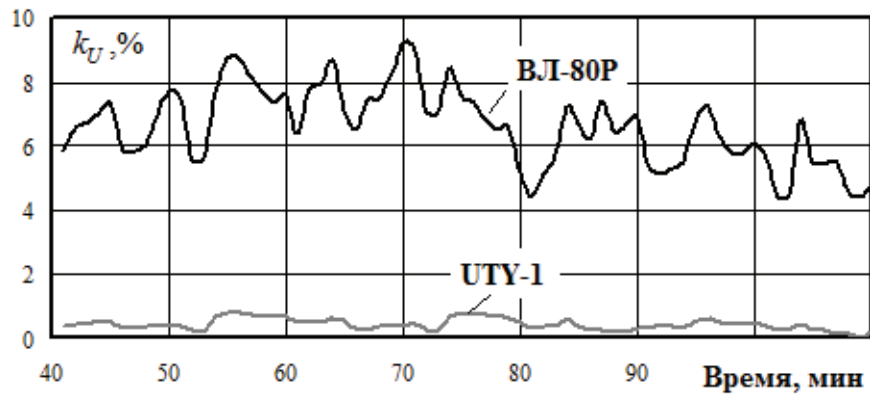
б)

Рис. 8. Токовые профили поездов массой 6384 т:
а – нечетное направление; б – четное направление

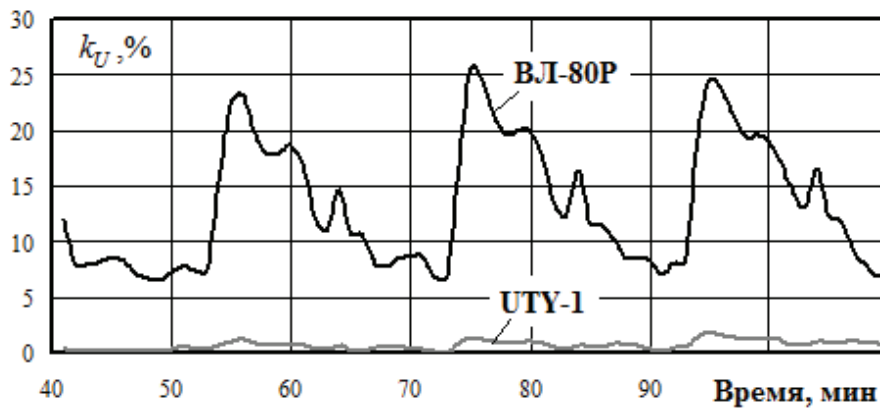
Таблица 1

Суммарные коэффициенты гармоник на шинах 220 кВ ТП-4

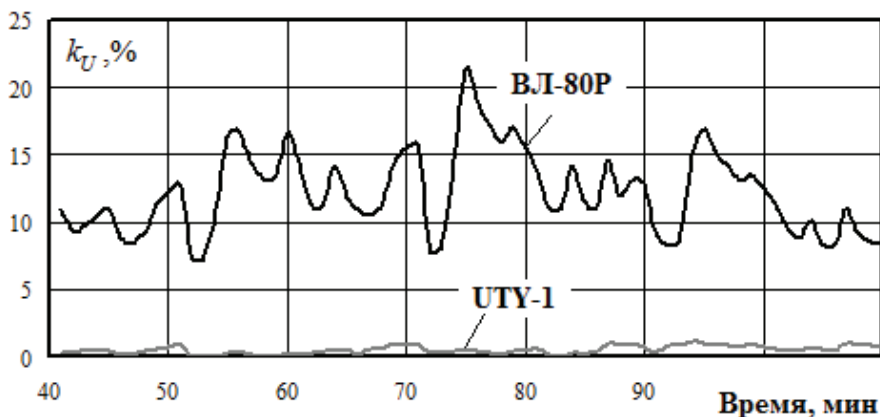
Фаза	ВЛ-80Р		УТУ-1		$\gamma k_U = \frac{k_U^{(ВЛ80Р)}}{k_U^{(УТУ1)}}$	
	Ср. значение	Максимум	Ср. значение	Максимум	Ср. значение	Максимум
А	6,61	9,25	0,43	0,81	15,39	11,48
В	13,21	25,61	0,70	1,68	18,74	15,24
С	12,24	21,44	0,53	1,14	23,11	18,82



а)



б)



в)

Рис. 9. Зависимости суммарных коэффициентов гармоник на шинах 110 кВ ТП-4 от времени: а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

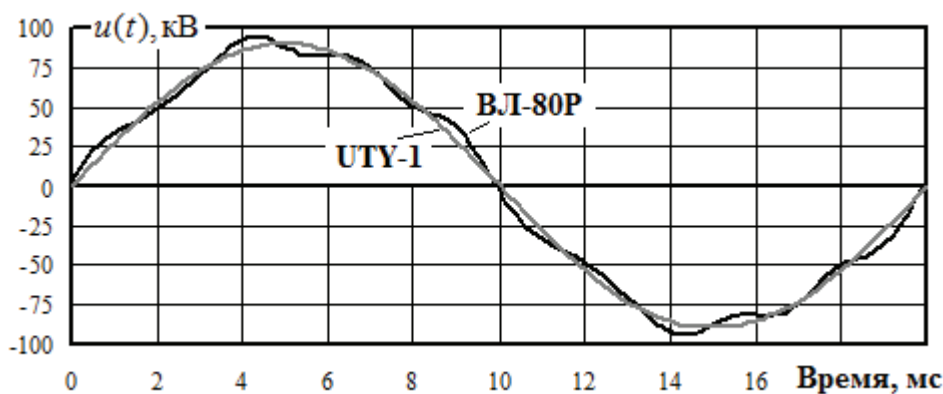
На рис. 9 представлены временные зависимости суммарных коэффициентов гармоник на шинах 110 кВ тяговой подстанции ТП-4.

Анализ представленных в табл. 1 и на рис. 9 результатов позволяет сделать следующие выводы.

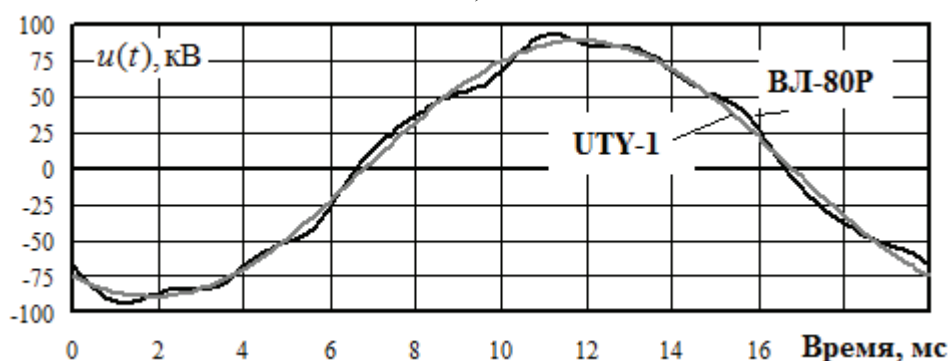
1. При движении поездов с локомотивами ВЛ-80Р уровни гармонических составляющих на шинах 110 кВ ТП-4 значительно превосходят предельно допустимые значения в 3 %. Для снижения

несинусоидальности требуется применение дорогостоящих средств, таких как пассивные и активные фильтры [18].

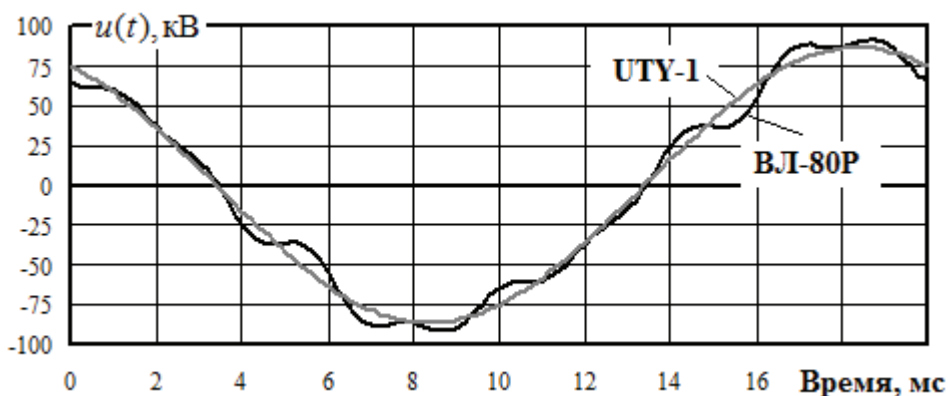
2. При движении поездов с электровозами УТУ-1 величины k_U не превышают нормально допустимых по ГОСТ 32114-2013 значений в 2 %. Уровни гармонических искажений по сравнению с движением электровозов ВЛ-80Р снижаются в 11...25 раз.



а)



б)



в)

Рис. 10. Формы кривых напряжений на шинах 110 кВ ТП-4: а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

Таким образом, проблема повышенного уровня гармонических искажений в сетях, примыкающих к тяговым подстанциям магистральных железных дорог, может быть полностью решена при замене существующих ЭПС на электровозы нового поколения с асинхронными электроприводами и четырехквadrантными преобразователями.

Заключение

На основе компьютерного моделирования несинусоидальных режимов типовой системы тя-

гового электроснабжения 25 кВ в программном комплексе Fazonord-APC показано, что на основе применения электроподвижного состава нового поколения с асинхронными двигателями и четырехквadrантными преобразователями уровни гармонических искажений в сетях, примыкающих к тяговым подстанциям, не превышают нормативных значений.

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 / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. / Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
5. Аррилага Д. Гармоники в электрических системах / Д. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. М. : Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
6. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электро-снабжения / 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. : Энергопрогресс, 2012. 108 с.
10. Карташов И.И., Зуев Э.Н. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. М. : Изд-во МЭИ, 2000. 120 с.
11. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов и др. М. : Изд-во 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., Каплычный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. Киев : Наукова думка, 1989. 312 с.
15. Долгов А.П., Канадаков 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. Суднова В.В. Качество электроэнергии. М. : Энергосервис, 2000. 80 с.
17. Бурков А.Т., Мирсаитов М.М. Режимы электротяговой сети при эксплуатации электровозов ВЛ–80Р и УТУ–1 // Современные технологии – транспорту. 2016. № 2. С. 146–160.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск : Изд-во ИрНИТУ, 2015. 218 с.
19. 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.
20. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложно-несимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-т. 2005. 273 с.

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 elektrich-eskikh 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., etc. Energieversorgung elektrischer bannen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2006, 732 p.
5. Arrilaga J., Bradley D.A., Bodger P.S., Power System Harmonics. John Wiley & Sons, New York, 1985. (Russ. ed.: Arrilaga D., Bredli D., Bodzher P. Garmoniki v elektricheskikh sistemakh. 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 nauchniy vestnik [The Journal Omsk Scientific Bulletin]*, 2013, No. 2(120), pp. 178–183.
7. Zhezhenko I.V., Saenko Yu.L., Gorpinich A.V. Vliyanie kachestva elektroenergii na sokrashchenie sroka 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. Zhezhenko 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. Spособы ego kontrolya i obespecheniya [Power quality in power supply systems. Ways to control and ensure it]. Moscow: Moscow Power Institute Publ., 2000, 120 p.
11. Kartashov I.I. et al. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Electricity Quality Management]. Moscow: Moscow Power Institute 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. Sudnova V.V. Kachestvo elektroenergii [Power quality]. Moscow: Energoservis Publ., 2000, 80 p.

17. Burkov A.T., Mirsaitov M.M. Rezhimy elektroyagovoi seti pri ekspluatatsii elektrovozov VL-80R i UTY-1 [Modes of electric traction network in the operation of electric locomotives VL-80R and UTY-1]. Sovremennye tekhnologii – transportu [Modern technologies for transport], No. 2. 2016, pp. 146–160.

18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intelktual'nye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii [Intelligent power quality control technology]. Irkutsk: INRTU Publ., 2015, 218 p.

19. 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: Irkutsk State Transport Un-ty Publ., 2011, 160 p.

20. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhonesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex non-symmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkutsk Un-ty Publ., 2005, 273 p.

Информация об авторах

Authors

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

Черепанов Александр Валерьевич - к. т. н., доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: smart_grid@mail.ru

Шафиков Алексей Рафаилович - аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: alshaficov1@mail.ru

Kryukov Andrei Vasil'evich - Doctor of Engineering Science, Full Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Cherepanov Aleksandr Valer'evich - Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: smart_grid@mail.ru

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

Для цитирования

For citation

Крюков А. В. Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог при движении локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Р. Шафиков // Современные технологии. Системный анализ. ние. - 2018. - Т. 60, № 4. - С. 99–108. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).99-108

Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Shafikov A. R. Modelirovanie nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog pri dvizhenii lokomotivov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [The modelling of nonsinusoidal modes in the railroad power supply systems when driving locomotives with induction traction motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2018, Vol. 60, No. 4, pp. 99–108. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).99-108

УДК 624.21 + 625.032.6 + 625.171

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).108-117

Д. С. Алтынников, Д. А. Ковенькин

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

Дата поступления: 16 ноября 2018 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ШЕЙКЕ РЕЛЬСОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПОДХОДАХ К МОСТАМ

Аннотация. В связи с тем, что пространственное развитие страны не стоит на месте, вместе с тем растет и потребность в увеличении пропускной способности и безопасной эксплуатации сети железных дорог, которая повышает конкурентоспособность российской экономики. Увеличение грузонапряженности и скоростного режима на путях железных дорог ведет к ускоренному расстройству железнодорожного полотна, что, в свою очередь, влияет на безопасность движения и дополнительные затраты. Поэтому решение данной проблемы поспособствует снижению экономических вложений и повысит надежность железнодорожных сообщений.

Расчет железнодорожного пути на прочность является одним из важных и сложных разделов общей проблемы исследования взаимодействия пути и подвижного состава. Для проведения такого расчета важным является нахождение правильных функциональных зависимостей между действующими на рельсовую нить внешними силами и модулем упругости. Величина данных показателей зависит от множества факторов, таких как скорость движения, радиус кривой, строение пути.

В статье описаны теоретические и экспериментальные исследования горизонтальной поперечной жесткости рельсовых нитей на подходах к мостам с безбалластным мостовым полотном. Установлено, что в рельсовом пути, расположенном