

В. П. ЗАКАРЮКИН, А. В. КРЮКОВ (ИРГУПС)

Иркутский государственный университет путей сообщения, Кафедра электроснабжения железнодорожного транспорта, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия, 664074, тел./факс: (3952) 638345, эл. почта: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ «ДВА ПРОВОДА – РЕЛЬС»

### Введение

Системы электроснабжения железных дорог переменного тока обладают рядом особенностей, отрицательно влияющих на показатели качества электрической энергии. Эти особенности заключаются в следующем:

- нестационарный, резкопеременный характер тяговых нагрузок, приводящий к значительным отклонениям и колебаниям напряжения на шинах 6-10-35 кВ обмоток тяговых подстанций (ТП), питающих нетяговых и нетранспортных потребителей;
- несимметрия напряжения на шинах ТП за счет однофазного характера тяговой нагрузки;
- значительная генерация выпрямительными электровозами высших гармоник, усугубляемая однофазностью этих генераторов, при которой не подавляются гармоники, кратные трем;
- конструктивная несимметрия технологических ЛЭП, выполненных по схеме «два провода – рельс»;
- электромагнитное влияние контактной сети на смежные линии электропередачи; при этом магнитное влияние существенно проявляется на высших гармониках.

В статье рассматривается в основном последнее обстоятельство, имеющее существенное значение для линий «провод – рельс» (ПР) и «два провода – рельс» (ДПР).

### Постановка задачи

Линии автоблокировки и продольного электроснабжения подвержены электрическому и магнитному влияниям контактной сети (КС) переменного тока [1]. Электрическое влияние создает напряжение нулевой последовательности на проводах линий 6-10-35 кВ, искажает учет электрической энергии (ЭЭ) на головных участках технологических ЛЭП, выполненных по схемам ПР и ДПР [2], но не приводит к увеличению доли высших гармоник. Существенное возрастание уровня несинусоидальности в смежных линиях ПР и ДПР возможно из-за пропорциональности наводимого напряжения магнитного влияния частоте влияющего тока.

Первичную оценку вклада последнего фактора можно сделать следующим образом. Напряжение магнитного влияния тока  $I_v$  с частотой  $\nu \omega = 2\pi f \nu$  определяется законом электромагнитной индукции с учетом экранирующего действия рельсов [1]:

$$U_v = \nu \omega M I_v \ell s_p,$$

где  $M_v = 10^{-4} \ln \left( \ell + \frac{6 \cdot 10^5}{a^2 \sigma f \nu} \right)$ , Гн/км – вза-

имная индуктивность 1 км смежного провода и контактной сети, рассчитанная для гармоники с номером  $\nu$ ;  $a$  – ширина сближения, м,  $\sigma$  – удельная проводимость земли, См/м;  $\ell$  – длина смежного провода, км;  $s_p$  – коэффициент экранирования рельсами, в первом приближении равный 0.5.

Если аппроксимировать тяговый ток прямоугольными импульсами с амплитудой  $I_m$ , то для тока нечетной гармоники с номером  $\nu$  можно записать [1]

$$I_v = \frac{4I_m}{\nu\pi}$$

Эффективное напряжение, наводимое высшими гармониками, при этом равно

$$U_E = \sqrt{\sum_{\nu=3}^n U_v^2} = \frac{4I_m \omega \ell s_p}{\pi} \sqrt{\sum_{\nu=3,5,7,\dots}^n M_v^2} \quad (1)$$

В формуле (1) суммирование проводится только по нечетным гармоникам, а величина  $n$  не превосходит 21 из-за необходимости учета на более высоких гармониках эффектов распределенности параметров.

Из анализа (1) видно, что напряжение  $U_E$  сопоставимо с напряжением, наводимым током основной частоты. Кроме того, нужно ожидать серьезного различия уровней несинусоидальности линейных напряжений  $\dot{U}_{AC}$  и  $\dot{U}_{BC}$  между проводами и заземленной фазой С по сравнению с напряжением  $\dot{U}_{AB}$  между парой незазем-

ленных проводов. Оценка несинусоидальности по формуле (1) при токе 300 А, длине линии 25 км, ширине сближения 7 м и проводимости земли 0.01 См/м дает значение коэффициента искажения кривой синусоидальности напряжения  $k_U = 13\%$ .

Обычно используется двухстороннее питание тяговой сети (ТС), приводящее к компенсации влияний отдельных участков ТС, кроме того, амплитуда токов гармоник падает с частотой несколько быстрее, чем обратная пропорциональность частоте. Эти соображения приводят к выводу о том, что  $k_U = 13\%$  является несколько завышенным значением. С другой стороны, несинусоидальность напряжений ДПР возникает как из-за гальванической связи с контактной сетью через шины 27.5 кВ подстанции, так и из-за магнитного влияния. Ввиду наличия двух причин несинусоидальности можно ожидать серьезно повышенного уровня гармоник в фазах линии ДПР.

### Методика моделирования

Уточненный анализ влияния КС на уровень высших гармоник в линиях ДПР можно провести с использованием разработанных в ИрГУПСе методов моделирования систем электроснабжения железных дорог [2...12] и программного комплекса Fazonord-Качество [13]. Комплекс позволяет проводить имитационное моделирование режимов СТЭ переменного тока (1×25 кВ, 2×25 кВ и новых типов) с одновременным расчетом высших гармоник, генерируемых электровозами и другими источниками несинусоидальности. Рассчитываемая электрическая система может включать в свой состав воздушные линии и контактные сети различной конфигурации, однофазные и многофазные трансформаторы с любым приемлемым на практике соединением обмоток, источники тока и ЭДС, балансирующие узлы, нагрузки в узлах сети и между ними. Токи гармоник электровоза при эффективном токе 150 А являются исходными данными при расчетах, которые проводятся с использованием визуальных компонент из набора элементов.

Методика расчетов мгновенных схем, позволяющая учесть однофазные источники тока гармоник и определить искажения синусоидальности напряжений на шинах потребителей, включает следующие положения:

- первоначальные расчеты проводятся на основной частоте с представлением нагрузок

величинами активных и реактивных мощностей;

- при определении режимов на высших гармониках нелинейные нагрузки моделируются источниками тока с заданием амплитуд в соответствии с правилами [14] и определением начальных фаз через фазу первой гармоники  $\psi_v = v\psi$ .

- в случае линий, имеющих заземленные токоведущие части (рельсы), а также при длине линии, превышающей 300/k (км), где  $k$  – номер гармоники, производится учет распределенности параметров путем составления цепочечных схем [2];

- активные и реактивные сопротивления рассеяния катушек трансформаторов пересчитываются пропорционально частоте;

- нагрузки для режимов высших гармоник замещаются последовательно соединенными резистором и индуктивным элементом с пересчетом реактивного сопротивления пропорционально частоте.

Представленный подход позволяет производить расчеты режимов систем электроснабжения железных дорог на основной частоте и частотах высших гармоник с учетом динамики движения поездов и взаимных электромагнитных влияний проводов многопроводных систем.

### Результаты моделирования и их обсуждение

Анализ влияния КС на качество ЭЭ проводился применительно к двухпутному участку железной дороги с электрификацией по системе 1х25 кВ (рис. 1). Межподстанционная зона (МПЗ) длиной 54 км между подстанциями ТП-Ч и ТП-Б получает питание по двухцепной ЛЭП 220 кВ от подстанций III типа по фазировке. Опорная тяговая подстанция ТП-Ч расположена вблизи подстанции энергосистемы 500/220 кВ. Продольное электроснабжение осуществляется по линии ДПР со стандартным расположением проводов. Один трансформатор 27,5/0,4 кВ подключен у поста секционирования на расстоянии 33,3 км от ТП-Ч, другой – в конце межподстанционной зоны. Подстанция ТП-Б характеризуется значительным энергопотреблением, в связи с чем в контактной сети протекает достаточно большой уравнивающий ток (около 60 А). Узлы 84, 85 отвечают точкам подключения двух контактных подвесок, узлы 116, 117 – ЛЭП ДПР, узел 135 – четырем объединенным рельсам. Расчеты проводились в двух вариантах: для консольного питания тяго-

вой сети со стороны ТП-Ч и для двустороннего питания МПЗ.

Для выявления влияния КС рассматривалась поездная ситуация с движением от подстанции ТП-Ч к ТП-Б только одного четного поезда массой 5000 т. Токочный профиль поезда при движении на МПЗ ТП Ч – ТП Б показан на рис. 2. МПЗ ТП Ч – ТП Б поезд проходит в интервале времени 93...150 мин.

На рис. 3 показано изменение напряжения на токоприемнике поезда при движении по

МПЗ с консольным питанием; напряжение понижается при удалении от питающей подстанции ТП-Ч.

Тяговая нагрузка консольной МПЗ приводит к значительным отклонениям напряжения на подстанциях ДПР. На рис. 4 показана динамика изменения фазных напряжений на шинах 0.4 кВ подстанции ТП ДПР 1, при отсутствии нагрузки на этой подстанции.

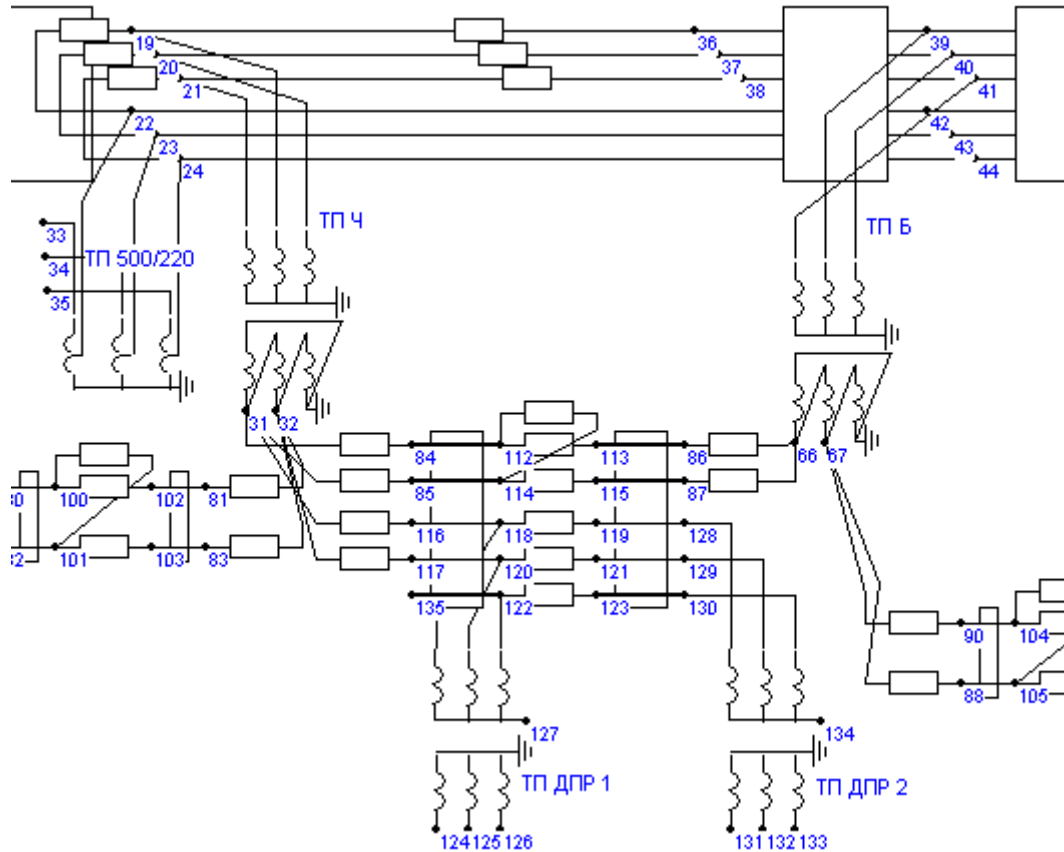


Рис. 1. Часть расчетной схемы участка

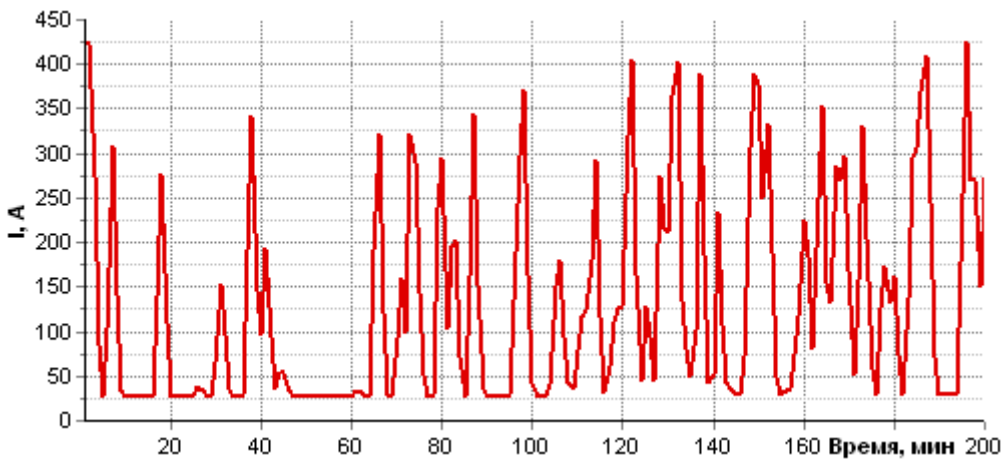


Рис. 2. Токочный профиль поезда

Наибольшее отклонение наблюдается для напряжения  $U_A$ , синфазного с напряжением, питающим тяговую нагрузку. Основной причиной отклонений является магнитное влияние КС, поскольку напряжение фазы А подстанции ДПР снижается на 12 %, в то время как напряжение фазы А тягового плеча ТП-Ч уменьшается только на 5 %. Отклонения напряжений  $U_B$  и  $U_C$  менее существенны. Значительные изменения напряже-

ний начинают проявляться ранее времени входа поезда на МПЗ (на 93-й минуте) из-за связи со смежной межподстанционной зоной через тяговый трансформатор.

Разные отклонения фазных напряжений приводят к существенной несимметрии. На рис. 5, 6 показана динамика изменения коэффициента несимметрии по обратной последовательности для подстанций, подключенных к ЛЭП ДПР.

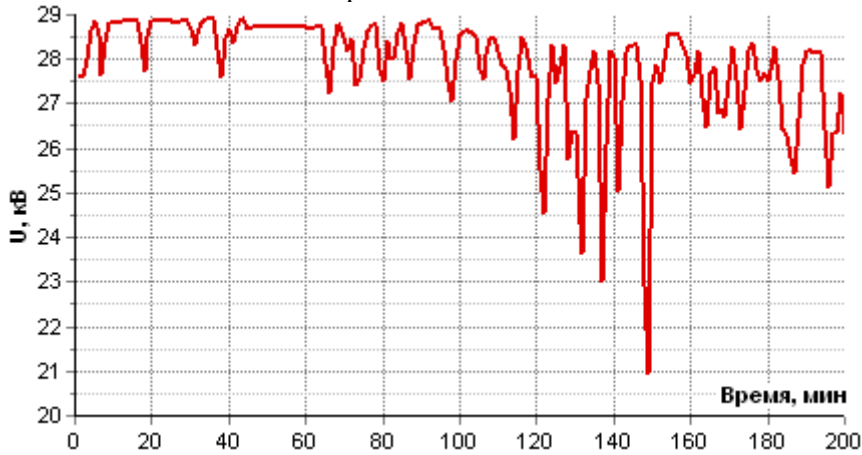


Рис. 3. Напряжение на токоприемнике поезда

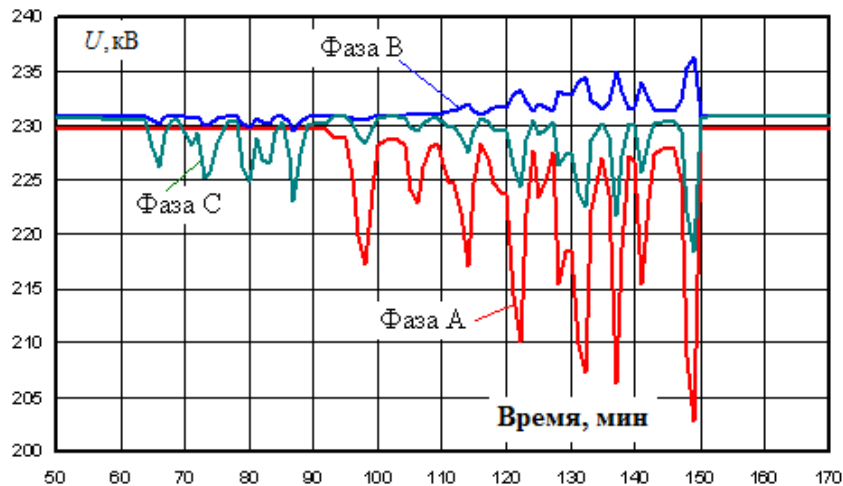


Рис. 4. Напряжение 0.4 кВ подстанции ТП-ДПР2

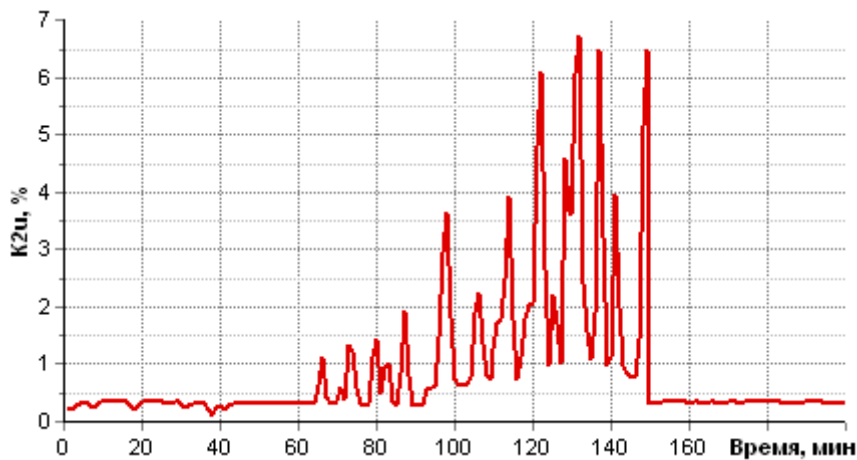


Рис. 5. Коэффициент несимметрии напряжения 0.4 кВ подстанции ТП-ДПР1

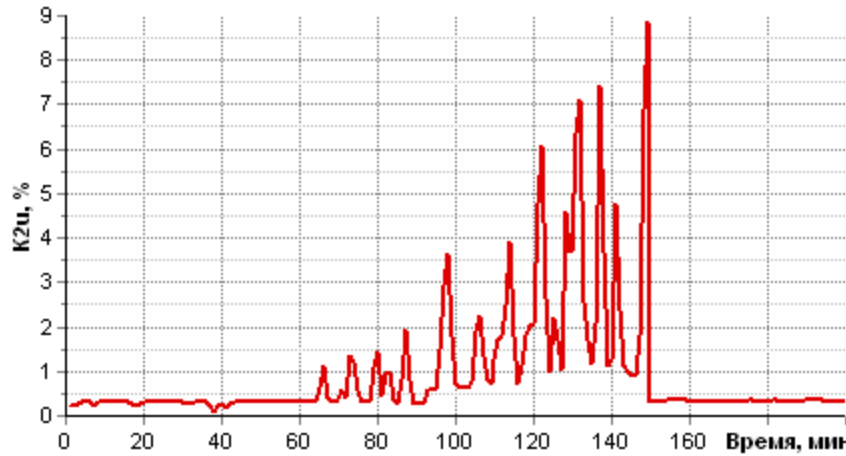


Рис. 6. Коефіцієнт несиметрії напруги 0,4 кВ підстанції ТП-ДПР2

Увеличение доли высших гармоник при магнитном влиянии приводит к серьезному повышению несинусоидальности напряжений в линии ДПР. При консольном питании МПЗ коэффициент несинусоидальности фазы А достигает 17% , а фазы В – 8% (рис. 7). Значительная несинусоидальность кривой напряжения  $U_A$  связана с питанием от загруженной фазы трансформатора и синфазностью падения напряжения и наведенного напряжения от гармоник тока электровоза.

На рис. 8 показана динамика изменения коэффициентов несинусоидальности для фаз А и В в точке подключения ЛЭП ДПР к ТП-Ч. Наблюдается разница в максимумах  $k_U$  в начале и конце ЛЭП ДПР (11% для фазы А), вызванная вкладом магнитного влияния тяговой сети при токе 400 А.

Наличие нагрузки на линии ДПР незначительно снижает несинусоидальность напряжений на стороне 27,5 кВ и приводит к некоторо-

му выравниванию коэффициентов несинусоидальности по фазам на шинах 0,4 кВ.

При двустороннем питании тяговой сети МПЗ несинусоидальность снижается до 3,4% в максимуме, значительно уменьшаются отклонения напряжения и несимметрия.

### Выводы

Качество электрической энергии потребителей, питающихся от линий «два провода – рельс», в значительной степени зависит от схемы питания тяговой сети межподстанционной зоны. При консольном питании МПЗ и токах поезда до 450 А за счет магнитного влияния контактной сети отклонения напряжения достигают 12 %, коэффициент несимметрии – 9 %, а коэффициент несинусоидальности – 17 %. По этим причинам консольное питание МПЗ является нежелательным. При двустороннем питании МПЗ максимальная несинусоидальность снижается до 3..4 %, значительно уменьшаются отклонения напряжения и несимметрия.

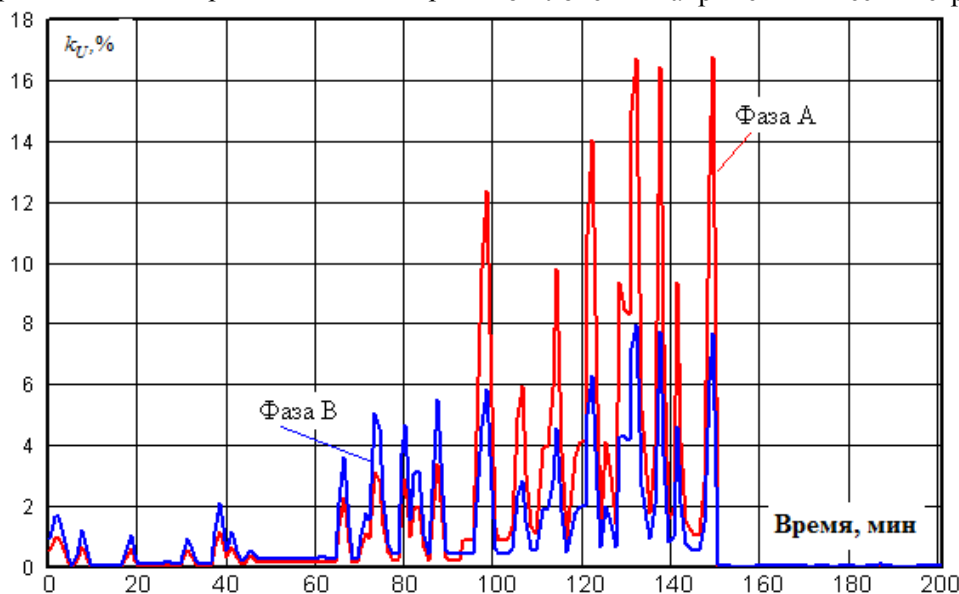


Рис. 7. Коефіцієнт искажения синусоидальности напряжения на шинах 27,5 кВ ТП-ДПР2

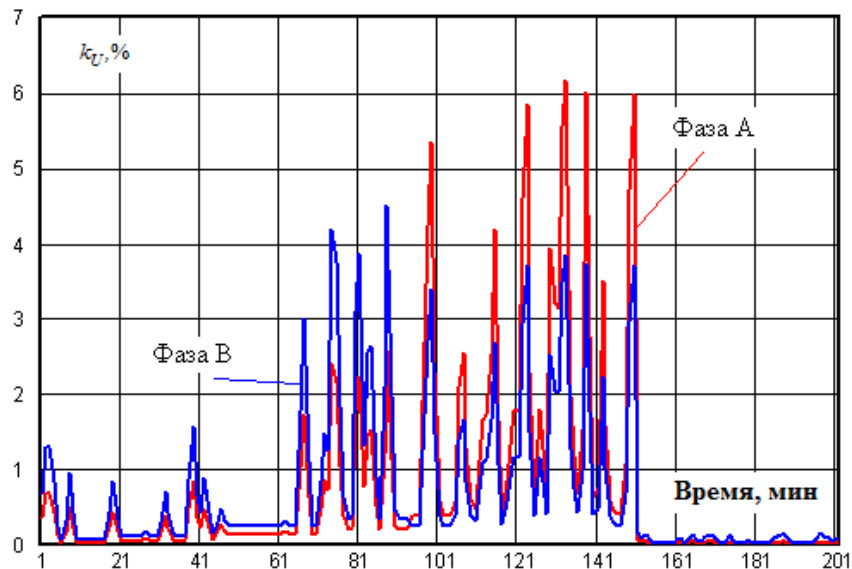


Рис. 8. Коефіцієнт іскаження синусоїдальності напруги фаз А і В в точці підключення ЛЭП ДПР к ТП-Ч

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость [Текст] / М.П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В.П.Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. – 273 с.
3. Крюков А.В. Управление режимами систем тягового электроснабжения [Текст] / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, С.М. Асташин. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения. 2009. – 124 с.
4. Крюков А.В. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах. [Текст] / А.В.Крюков, В.П. Закарюкин – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2009. – 120 с.
5. Крюков А.В. Ситуационное управление режимами систем тягового электроснабжения [Текст] / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, Н.А. Абрамов – Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2010. – 123 с.
6. Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами [Текст] / А.В. Крюков, В.П.Закарюкин, В.Ю. Соколов. – Иркутск: ИргУПС, 2010. – 80 с.
7. Крюков А.В. Электромагнитная обстановка на объектах железнодорожного транспорта [Текст] / А.В.Крюков, В.П.Закарюкин, Н.В. Буякова – Иркутск: ИргУПС, 2011. – 130 с.
8. Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: ИргУПС, 2011. – 170 с.
9. Крюков А.В. Математические модели для определения взаимных электромагнитных влияний в системах тягового электроснабжения [Текст] / А.В.Крюков, В.П.Закарюкин, Д.А.Кобычев. – Иркутск: ИргУПС, 2011. – 110 с.
10. Крюков А.В. Предельные режимы электроснабжения железных дорог переменного тока. © Закарюкин В. П., Крюков А. В., 2014

REFERENCES

1. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovmestnost'*[Electromagnetic compatibility]. – Moskow, UMK MPS Publ, 2002. 638 p.
2. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhno-nesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [It is difficult to single-ended mode of electrical systems]. – Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2005. 273 p.
3. Kryukov A.V., V.P. Zakaryukin, S.M. Astashin. *Upravlenie rezhimami sistem tyagovogo elektrosnabzheniya* [Mode control systems, traction power supply]. – Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2009. 124 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 effects on adjacent transmission lines based on the operating conditions of the power system in the phase coordinates.] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ 2009. 120 p.
5. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Abramov N.A. *Situatsionnoe upravlenie rezhimami sistem tyagovogo elektrosnabzheniya* [Contingency management modes of traction power supply] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2010. 123 p.
6. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Sokolov V.Yu. *Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya s moshchnymi tokoprovodami* [Modeling of power supply systems with powerful electrical conductors] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2010. 80 p.
7. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. *Elektromagnitnaya obstanovka na ob"ektakh zheleznodorozhnogo transporta* [The electromagnetic conditions at the facilities of Railway Transport] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2011. 130 p.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznikh dorog peremennogo toka.*[ Methods of co-simulation of traction and external power supply AC railways.] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2014.

троэнергетических систем [Текст] / А.В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 236 с.

11. Закарюкин В.П., Параметрическая идентификация линий электропередачи и трансформаторов [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, М.С. Шульгин. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 96 с.

12. Оперативное управление в системах электропитания железных дорог [Текст] / под ред. В.П. Закарюкин. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 129 с.

13. Пат. 2007612771 Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электропитания в фазных координатах с учетом движения поездов: Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ / Закарюкин В.П., Крюков А.В.; Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – Зарегистр. 28.06.2007.

14. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1989. – 134 с.

Поступила в печать 24.03.2014.

Univ. Publ. 2011. 170 p.

9. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Kobychев D.A. *Matematicheskie modeli dlya opredeleniya vzaimnykh elektromagnitnykh vliyaniy v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya* [Mathematical models for determining the mutual electromagnetic influences in traction power supply systems] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2011. 110 p.

10. Kryukov A.V. *Predel'nye rezhimy elektroenergeticheskikh sistem* [Limiting operating electric power systems] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2012. 236 p.

11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. *Parametricheskaya identifikatsiya liniy elektropredachi i transformatorov* [Parametric identification of lines and transformers] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2012. 96 p.

12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ushakov V.A., Alekseenko V.A. *Operativnoe upravlenie v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Operational management systems of railway power supply] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2012. 129 p.

13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Fazonord-Kachestvo – Raschety pokazateley kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya v faznykh koordinatakh s uchetom dvizheniya poezdov* [Fazonord-Quality - The Quality of electricity supply systems in the phase coordinates with the movement of trains]. Patent, no 2007612771

14. *Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi i provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoy seti elektrifi-tsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka* [Terms protection devices wired and wire broadcasting from the influence of traction network elektrifi-fied railways AC] Moscow, Transport Publ. 1989. 134 p.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

Проведен численный и аналитический расчет влияния контактной сети на уровень высших гармоник в линиях «два провода – рельс (ДПР)». Показано, что качество электрической энергии потребителей, питающихся от линий ДПР, в значительной степени зависит от схемы питания межподстанционной зоны. При консольном питании и токах контактной сети до 450 А за счет магнитного влияния контактной сети отклонения напряжения достигают 12 %, коэффициент несимметрии – 9 %, а коэффициент несинусоидальности – 17 % (при токах контактной сети, равных 300..400 А). При двустороннем питании межподстанционных зон максимальная несинусоидальность снижается до 3..4 %, значительно уменьшаются отклонения напряжения и несимметрия.

**Ключевые слова:** системы тягового электропитания, линии «два провода-рельс», качество электрической энергии.

УДК 621.331

В. П. ЗАКАРЮКІН, А. В. КРЮКОВ (ІРГУПС)

Іркутський державний університет шляхів сполучення, Кафедра електропостачання залізничного транспорту, вул. Чернишевського, 15, Іркутськ, Росія, 664074, тел./факс: (3952) 638345, ел. пошта: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ «ДВА ПРОВІДИ – РЕЙКА»

Проведений чисельний і аналітичний аналіз впливу контактної мережі на рівень вищих гармонік в лініях «два дроти – рейка (ДПР)». Показано, що якість електричної енергії споживачів, що харчуються від ліній ДПР, в значній мірі залежить від схеми живлення зони міжпідстанції.

При консольному живленні за рахунок магнітного впливу контактної мережі відхилення напруги досягають 12 %, коефіцієнт несиметрії – 9 %, а коефіцієнт несинусоїдальності – 17 % (при струмах контактної мережі, рівних 300...400 А). При двосторонньому живленні зон міжпідстанцій максимальна несинусоїдальність знижується до 3...4 %, значно зменшуються відхилення напруги і несиметрія.

**Ключові слова:** системи тягового електропостачання, лінії «два дроти-рейка», якість електричної енергії.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

UDC 621.331

V. P. ZAKARYUKIN, A. V. KRYUKOV (IRSURT)

Irkutsk State Transport University, Department of railway transport power supply, 15 Chernyshevskaya Street, Irkutsk, Russia, 664074, phone/fax: (3952) 638345, e-mail: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## THE ELECTRIC POWER QUALITY IN THE POWER LINES "TWO WIRES – RAIL"

The numerical and analytical approach of contact network influence on high harmonicas level in the lines "two wires-rail (TWR)" is carried out. It is shown that quality of electric energy of TWR lines consumers substantially depends on a power supply of an railway zone. At console scheme due to contact network magnetic influence voltage deviations reach 12 %, asymmetry coefficient – 9%, and THD – 17% (at the current of a contact network equals 300...400 A). At bilateral scheme of railway zone the maximum level of harmonious distortions decreases to 3...4%, considerably decrease voltage deviations and asymmetry.

**Keywords:** traction power supply systems, "two wires – rail" line, electric energy quality.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Saenko Y. L.*