

## Транспорт

УДК 629.423.1: 621.331

DOI: 10.30987/article\_5d9317b307f835.52624411

Ю.С. Кабалык, С.А. Шухарев, Д.Ю. Дроголов

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

С целью определения уровня электрических потерь в контактной сети железных дорог проведено компьютерное моделирование с применением программы *Cadence OrCAD*. Показано, насколько эти потери зависят от величины и уровня искаже-

ния тока электровоза.

**Ключевые слова:** электровоз переменного тока, электрическая мощность, потери мощности, потери напряжения, контактная сеть, компенсатор реактивной мощности.

Yu.S. Kabalyk, S.A. Shukharev, D.Yu. Drogolov

### ELECTRIC LOSS IN RAILWAY CONTACT NETWORK AT AC ELECTRIC LOCOMOTIVE OPERATION

The purpose of this work is a quantitative definition of electric power loss in a railway contact network. Electric locomotive power supply is carried out from traction substations through a contact network. During electric locomotive operation power losses take place in a contact network as a result of which voltage decreases on the electric locomotive pantograph and also decreases electric motive power efficiency. Such losses of power and voltage depend upon electric locomotive location in an inter-substation area, its power realized and a power factor. At the same time current consumed by an electric locomotive contains higher harmonics which can cause additional losses in a contact network. For the definition of a loss level there was carried out a computer modeling with the use of *Cadence OrCAD* program. During modeling there was

simulated an electric locomotive operation in a contact network area. The modeling results have shown to what extent a current form of an electric locomotive differs at different quality of power consumption. The quantitative values of the computation characterize the level of power and voltage losses at different forms of power consumption. It is proved that the use of the ideal compensator for a phase alignment is less efficient than the use of the passive compensator of jet power. It tells of that along with the phase alignment it is necessary to pay a particular regard to the harmonic distortion of power consumption.

**Key words:** AC electric locomotive, electric power, power loss, voltage loss, contact network, reactive power compensator.

#### Введение

В системе электрической тяги железных дорог передача энергии в основном происходит по следующему пути: тяговые подстанции - контактная (тяговая) сеть - электровоз. При такой передаче электрической энергии неизбежно происходят электрические потери в контактной сети. К этим потерям относятся потери мощности, которые определяют коэффициент полезного действия электрической тяги, и потери напряжения, от которых зависит уровень напряжения питания электровоза. Уровень потерь в контактной сети определяется её собственными параметрами и током, проходящим по ней. Согласно исследованиям [1-2], контактная сеть представляет собой линию с распределенными

нелинейными параметрами. В этой связи потери в ней будут определяться не только величиной тока, но и его гармоническим составом, или, другими словами, уровнем искажения.

Основная часть электровозов переменного тока, эксплуатирующихся на полигоне российских железных дорог, обладают тяговыми двигателями постоянного тока. Для питания тяговых двигателей на таких электровозах в основном применяют тиристорные выпрямительно-инверторные преобразователи. Основным энергетическим недостатком таких преобразователей является их низкий коэффициент мощности. Значение этого коэффициента не является постоянным и изменяется в процес-

се регулирования мощности. Изменение коэффициента мощности таких электровазов составляет от 0,65 до 0,85 в режиме тяги и от 0,5 до 0,75 в режиме рекуперации. Низкие значения коэффициента мощности говорят о большом уровне реактивной энергии, что вызывает дополнительные потери в контактной сети. Кроме того, спектр потребляемого такими электровазами тока содержит значительное число высших гармоник, что вносит свои коррективы в уровень потерь в контактной сети [3].

Для повышения коэффициента мощности и, как следствие, снижения потерь в контактной сети на электровазах устанавливают компенсаторы реактивной мощности (КРМ). Существует множество разновидностей таких компенсаторов, но наиболее распространенными и уже неоднократно испытанными являются пассивные компенсаторы, выполненные в виде последовательно соединенных емкостей и индуктивностей, образующих колебательный контур [4; 5]. Колебательные контуры пас-

сивных компенсаторов настраивают на частоту, близкую к третьей гармонике, поскольку эта гармоника является одной из наиболее выраженных в спектре тока электроваза. Применение пассивных компенсаторов позволяет снизить практически до нуля фазовый сдвиг между током и напряжением, а также понизить уровень высших гармоник тока, благодаря чему приводит к повышению коэффициента мощности электроваза.

Определение степени влияния различной формы тока электроваза (его гармонического состава) на уровень потерь в тяговой сети возможно путём проведения расчетов электромагнитных процессов. Такой расчет в системе «тяговые подстанции - контактная сеть - электроваз», с учётом нелинейности контактной сети и наличия КРМ, представляет собой довольно сложную задачу. Наиболее простым способом решения этой задачи является компьютерное моделирование работы электроваза с помощью современных программ схемотехнического моделирования.

### Методы исследования

Для указанных выше целей в программе *Cadence OrCAD* был создан участок контактной сети с электровазом. При всех опытах исследованию подвергалась модель электроваза 2ЭС5К, находящегося посередине участка контактной сети длиной 50 км, по краям которого установлены тяговые подстанции (рис. 1) [6]. В качестве модели контактной сети была взята схема, предложенная авторами работы [1]. Модель электроваза была выполнена с учётом компонентов, описанных в [7; 8]. Посколь-

ку внимание в опытах было акцентировано на электромагнитных процессах в контактной сети, то модель тяговой подстанции была максимально упрощена и представляла собой последовательно соединённые источник ЭДС  $E_{ТП}$ , активное  $R_{ТП}$  и индуктивное  $L_{ТП}$  сопротивление. Для изменения формы тока, потребляемого электровазом, изменялась компоновка силовых цепей электроваза при сохранении параметров контактной сети.

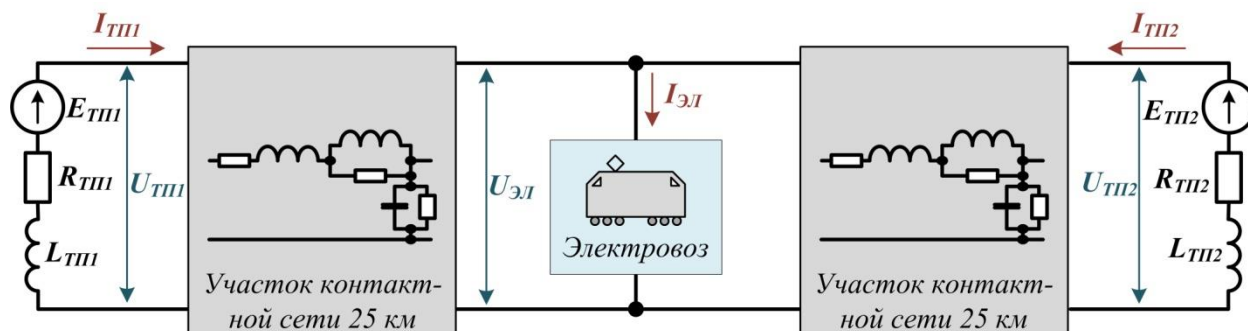


Рис. 1. Структура моделируемой системы

Для всех опытов была принята одинаковой реализуемая мощность электровоза, в качестве которой была взята электрическая мощность всех тяговых двигателей. Это было сделано с тем соображением, что реализуемая мощность является задающей при определении эксплуатационных параметров электровоза. Иными словами, во всех опытах электровоз реализует одинаковую мощность, но по-разному потребляет электрическую энергию. В качестве реализуемой мощности была взята величина  $\sum P_{\text{тэд.эл.}} = 5600$  кВт, что составляет 92 % от мощности продолжительного режима электровоза 2ЭС5К. При компенсации реактивной мощности напряжение в контактной сети повышается, в результате чего повысится напряжение на тяговых двигателях и вырастет их мощность. В таком случае для стабилизации мощности можно увеличить угол открытия тиристорных преобразователей, что снизит напряжение на его выходе. Однако изменение угла открытия приведёт к изменению гармонического состава потребляемого тока, что не позволит одинаково оценивать разные способы компенсации реактивной мощности. По этой причине для выравнивания реализуемой мощности при изменении напряжения в контактной сети применялось изменение скорости локомотива: увеличение скорости приводит к возрастанию противоЭДС двигателя, что снижает его ток и электрическую мощность. Во вспомогательных цепях электровоза не используются мощные преобразователи, поэтому нагрузка вспомогательных нужд моделировалась активным сопротивлением 1,44 Ом, что при напряжении 380 В даёт нагрузку 100 кВт.

Моделирование проводилось при следующих вариантах компоновки схемы:

1. Штатная схема электровоза. В этом варианте схема электровоза была аналогична штатной, силовые преобразователи работали на середине четвертой зоны регулирования. Этот вариант позволяет оценить влияние типовой работы электровоза на потери в контактной сети.

2. Штатный электровоз, потребляющий неискажённый ток. В этом случае вместо схемы электровоза был установлен

источник синусоидального тока, который генерирует ток, равный первой гармонике из спектра тока электровоза при первом варианте компоновки схемы. Такой вариант позволяет оценить влияние неискажённого тока на потери в контактной сети.

3. Штатный электровоз с идеальным компенсатором фазового сдвига тока. Схема электровоза была аналогична первому варианту, однако параллельно электровозу был установлен источник синусоидального тока, фаза которого смещена на 90 электрических градусов относительно напряжения. Амплитуда тока в источнике была рассчитана таким образом, чтобы свести к нулю фазовый сдвиг между током и напряжением. Такой вариант позволяет оценить влияние искажающего фактора на потери в контактной сети.

4. Электровоз с пассивным КРМ. В качестве схемы компенсатора была взята схема КРМ, разработанная сотрудниками ВЭЛНИИ и представленная в [4; 5]. Суммарная мощность КРМ была подобрана такой, чтобы максимально увеличить коэффициент мощности электровоза. Компенсатор установлен в схему между вторичной обмоткой трансформатора и силовыми преобразователями. Такой вариант позволяет оценить способность пассивных КРМ снижать уровень потерь в контактной сети.

5. Электровоз с коэффициентом мощности, равным единице. Вместо схемы электровоза был установлен резистор номиналом 122,4 Ом, который при напряжении 26,6 кВ имеет мощность 5800 кВт. Такая величина мощности была принята как сумма электрической мощности всех двигателей, мощности вспомогательных нужд и мощности потерь в элементах цепи электровоза. Можно говорить, что при этом варианте будет использоваться идеальный с точки зрения качества потребления электроэнергии электровоз, у которого коэффициент мощности равен единице. Этот вариант позволяет оценить влияние чисто активного тока на потери в контактной сети.

В исследовании вычислялись следующие параметры: активные мощности подстанций и электровоза; полные мощно-

сти подстанций и электровоза; действующие значения тока и напряжения на электровозе и подстанциях. Значения этих параметров рассчитывались программными средствами на основе мгновенных значений тока и напряжения. Действующие значения тока ( $I_{ТП}$ ,  $I_{ЭЛ}$ ) и напряжения ( $U_{ТП}$ ,  $U_{ЭЛ}$ ), а также активная ( $P_{ТП1}$ ,  $P_{ТП2}$ ,  $P_{ЭЛ}$ ) и полная ( $S_{ТП1}$ ,  $S_{ТП2}$ ,  $S_{ЭЛ}$ ) мощности рассчитывались по формулам:

$$I_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_x^2 dt};$$

### Результаты исследования

На рис. 2 представлены осциллограммы тока электровоза при разных вариантах компоновки схемы. Для визуальной оценки уровня искажения и фазового сдвига на осциллограмме тока представлена первая гармоника питающего напряжения электровоза (в уменьшенном произвольном масштабе). Из рис. 2 видно, что ток штатного электровоза имеет значительные искажения и фазовый сдвиг. Первая гармоника тока у штатного электровоза (второй вариант) имеет фазовый сдвиг около 45 электрических градусов. В третьем варианте осциллограмма тока имеет наибольшее искажение, однако фазовый сдвиг первой гармоники тока равен нулю. Из сравнения осциллограмм третьего и четвертого вариантов видно, что при ис-

$$U_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_x^2 dt};$$

$$P_x = \frac{1}{T} \int_0^T u_x i_x dt;$$

$$S_x = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T u_x^2 dt \int_0^T i_x^2 dt},$$

где  $T$  - период питающего переменного напряжения,  $T = 0,02$  с;  $x$  - отнесение параметра к подстанции или электровозу (ТП1, ТП2 или ЭЛ);  $u$  - мгновенное значение напряжения;  $i$  - мгновенное значение тока.

пользовании пассивного компенсатора снижается общее искажение тока электровоза и кривая тока становится более приближена к идеальной (пятый вариант).

В табл. 1 приведены основные параметры моделируемой системы при различных вариантах её компоновки. Видно, что активная мощность электровоза с пассивными КРМ меньше активной мощности штатного электровоза на 69,7 кВт, или на 1,1 %. Это объясняется тем, что снизился общий ток электровоза, а значит, снизились потери в проводниках от его протекания. Также из таблицы видна тенденция снижения полной мощности электровоза с исключением мощности искажения (варианты 2 и 5) и с применением компенсаторов (варианты 3 и 4).

Таблица 1

Результаты исследований на моделируемой системе

Параметр	Вариант компоновки схемы				
	1	2	3	4	5
Активная мощность двух тяговых подстанций $\Sigma P_{ТП} = (P_{ТП1} + P_{ТП2})$ , кВт	6134,4	5859,4	6046,5	6064,7	5934,5
Полная мощность двух тяговых подстанций $\Sigma S_{ТП} = (S_{ТП1} + S_{ТП2})$ , кВА	8637,6	8018,2	6415,9	6158,9	5937,9
Действующее напряжение подстанции $U_{ТП}$ , кВ	26,46	26,4	27,09	27,04	27
Действующий ток подстанции $I_{ТП}$ , А	163,2	151,8	118,4	113,9	110
Активная мощность электровоза $P_{ЭЛ}$ , кВт	5886,1	5640,9	5899,3	5926,5	5804,1
Полная мощность электровоза $S_{ЭЛ}$ , кВА	8462,1	7883,9	6236,3	6002,8	5804,1
Действующее напряжение на электровозе $U_{ЭЛ}$ , кВ	25,52	25,36	26,82	26,67	26,58
Действующий ток электровоза $I_{ЭЛ}$ , А	331,6	310,9	232,5	225,1	218,4
Электрическая мощность всех ТЭД $\Sigma P_{ТЭД}$ , кВт	5599,7	---	5597,8	5601,1	---

В табл. 2 представлен расчёт энергетических параметров на основе результатов компьютерного моделирования. Из таблицы видно, что применение пассивного КРМ позволяет снизить реактивную мощность более чем в 6 раз. При этом коэффициент мощности возрастает до 98,7 %, что приемлемо для современных энергоэффективных потребителей. Наимень-

шие потери напряжения в контактной сети получены при использовании идеального компенсатора фазового сдвига (3-й вариант). При четвертом и пятом вариантах потери напряжения примерно одинаковые и в 2,5 раза меньше, чем в штатном электровозе. Для визуальной оценки уровня электрических потерь на основе данных табл. 2 была составлена гистограмма (рис. 3).

**Компоновка схемы электровоза**

**Осциллограмма тока электровоза**

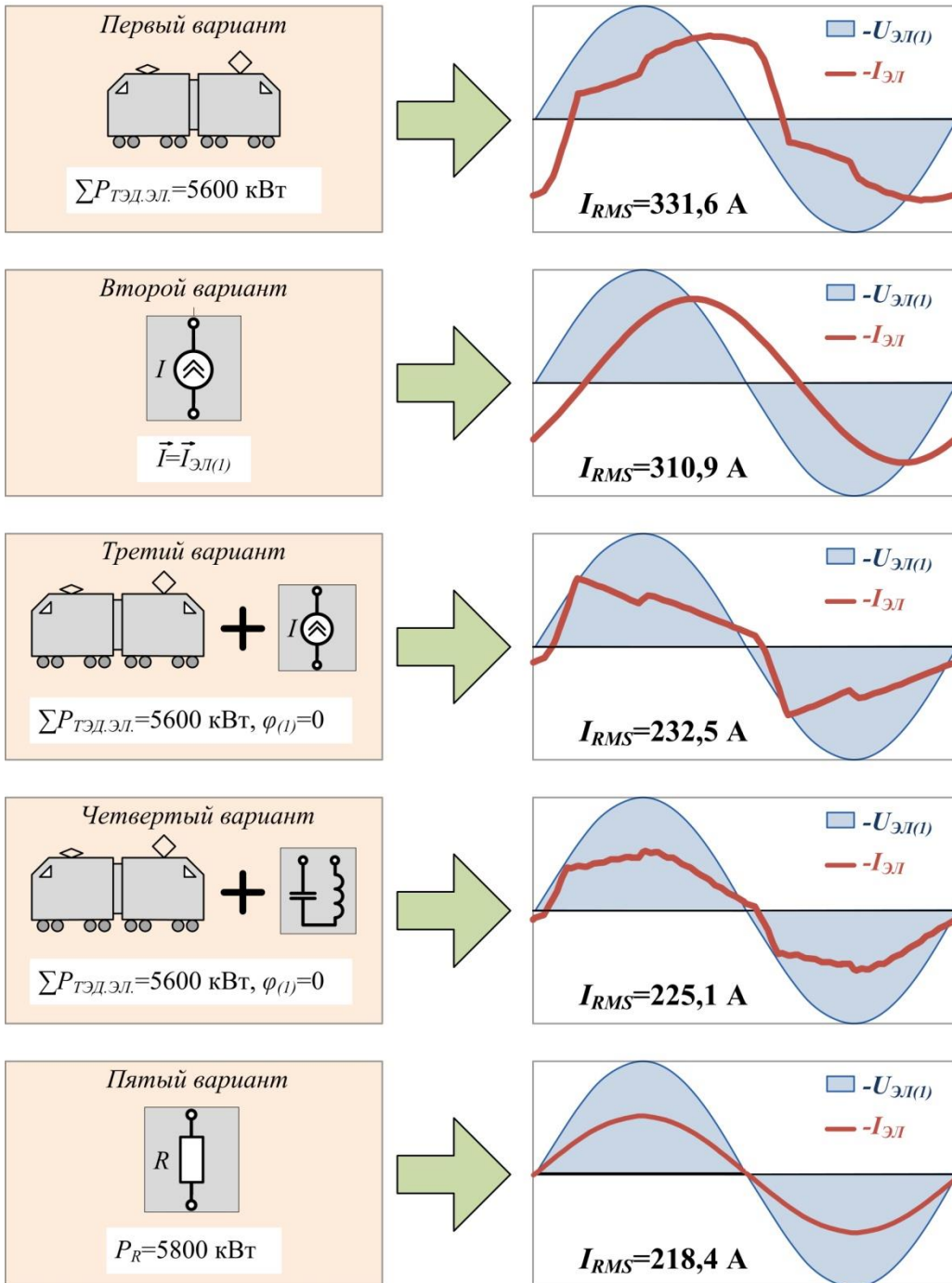


Рис. 2. Осциллограммы тока электровоза при различных компоновках силовой схемы

Таблица 2

## Результаты расчетов энергетических параметров в моделируемой системе

Параметр	Вариант компоновки схемы				
	1	2	3	4	5
Реактивная мощность электровоза $Q_{эл} = \sqrt{S_{эл}^2 - P_{эл}^2}$ , кВА	6079,5	5507,8	2022,3	954,0	0
Коэффициент мощности электровоза $K_M = (P_{эл} / S_{эл})$ , %	69,6	71,5	94,6	98,7	100
Потери напряжения в контактной сети $\Delta U_{КС} = (U_{ТП} - U_{эл})$ , кВ	0,94	1,04	0,27	0,37	0,42
Потери мощности в контактной сети $\Delta P_{КС} = (\Sigma P_{ТП} - P_{эл})$ , кВт	248,3	218,5	147,2	138,2	130,4

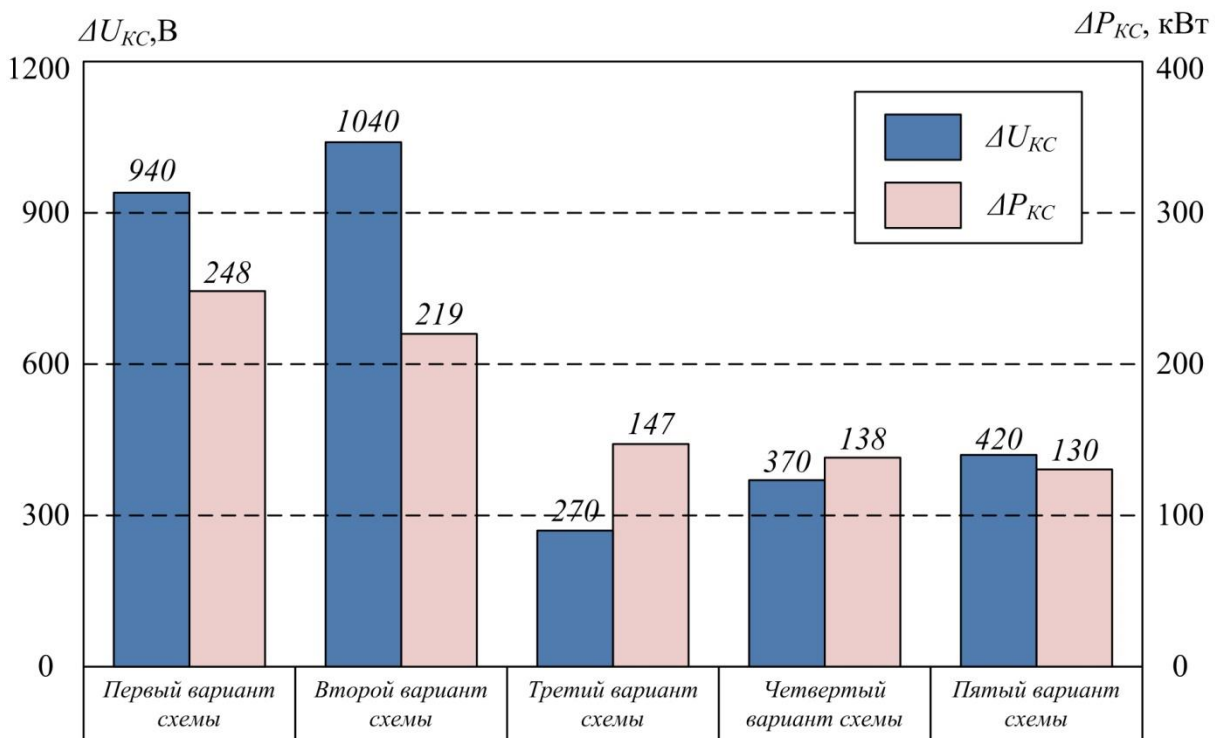


Рис. 3. Изменение электрических потерь при различном качестве потребления электрической энергии

В целом при наличии искажения тока (варианты 1, 3 и 4) наблюдаются меньшие потери напряжения в контактной сети, чем при синусоидальном токе (варианты 2 и 5). Такой результат связан с частотными особенностями модели контактной сети, в которой преобладает индуктивное сопротивление. Чем выше частота гармоники, тем ниже индуктивное сопротивление, по этой причине высшие гармоники напряжения испытывают меньшее сопротивление в контактной сети. Также из результатов расчета видно, что потери мощности в контактной сети снижаются от первого варианта компоновки схемы к пятому. При штатном электровозе (вариант 1) потери

мощности в контактной сети составляют 4,2 % от активной мощности электровоза, а при чисто активной нагрузке (вариант 5) - 2,2 %. Сравнение первого и второго вариантов говорит о том, что искажение тока вызывает дополнительные потери мощности в 29,8 кВт. Третий вариант от пятого отличается только наличием искажения тока и немного большей активной мощностью электровоза. В этой связи можно найти разницу потерь мощности в контактной сети между данными вариантами (что также будет говорить о влиянии искажающего фактора), которая составит 16,8 кВт. Эта разница значительно меньше разницы между первым и вторым вариантами. Та-

кой результат можно объяснить тем, что потери мощности в активных сопротивлениях определяются квадратом тока, а в первых двух вариантах действующее значение тока больше. Вместе с тем прослеживается чёткая зависимость между действующим значением тока электровоза и потерями мощности в контактной сети.

Также следует отметить, что исполь-

зование пассивного КРМ (4-й вариант) снижает потери мощности в контактной сети больше, чем использование идеально-го компенсатора фазового сдвига (3-й вариант). Это говорит о том, что пассивный КРМ снижает не только фазовый сдвиг, но и величину высших гармоник тока электровоза.

## Выводы

1. Потери мощности в контактной сети составляют от 2,2 до 4,2 % от активной мощности электровоза в зависимости от величины его коэффициента мощности.

2. Использование пассивного КРМ является эффективным и в некоторой степени достаточным средством компенсации реактивной мощности электровоза. Такой

компенсатор снижает не только фазовый сдвиг между током и напряжением, но и гармоническое искажение кривой тока.

3. Потери напряжения в контактной сети зависят не только от величины тока, протекающего по ней, но и от уровня искажения этого тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савоськин, А.Н. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть – электровоз» / А.Н. Савоськин, Ю.М. Кулинич, А.С. Алексеев // *Электричество*. – 2002. – № 2. – С. 29-35.
2. Кулинич, Ю.М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения: монография / Ю.М. Кулинич. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. – 153 с.
3. Макашева, С.И. Мониторинг качества электрической энергии в системе тягового электро-снабжения переменного тока: монография / С.И. Макашева. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. – 108 с.
4. Копанев, А.С. Испытания системы компенсации реактивной мощности на электровозе ЗЭС5К / А.С. Копанев, П.А. Хрипков, В.М. Волков, П.С. Вольт // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостро-*

ния. – 2010. – № 2. – С. 14-36.

5. Фошкина, Н.В. Применение компенсатора реактивной мощности на электровозе ЗЭС5К / Н.В. Фошкина, В.М. Малышев, И.Л. Козловский // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения*. – 2010. – № 2. – С. 37-42.
6. Справочник по электроснабжению железных дорог / под ред. К.Г. Маркварда. – М.: Транспорт, 1980. – Т. 1. – 256 с.
7. Власьевский, С.В. Математическое моделирование процессов коммутации в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока: монография / С.В. Власьевский. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. – 138 с.
8. Кабалык, Ю.С. Снижение высших гармоник напряжения в тяговой сети электрифицированных железных дорог посредством активной фильтрации: монография / Ю.С. Кабалык. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – 128 с.

1. Savoskin, A.N. Simulation of electromagnetic processes in “contact network-electric locomotive” dynamic system / A.N. Savoskin, Yu.M. Kulinich, A.S. Alexeev // *Electricity*. – 2002. – No.2. – pp. 29-35.
2. Kulinich, Yu.M. *Automatic Control Adaptive System for Hybrid Compensator of Jet Power of Electric Locomotive with Voltage Smooth Control*: monograph / Yu.M. Kulinich. – Khabarovsk: Pub-

lishing House of FESUC, 2001. – pp. 153.

3. Makasheva, S.I. *Monitoring of Electric Power Quality in System of AC Traction Power Supply*: monograph / S.I. Makasheva. – Khabarovsk: Publishing House of FESUC, 2009. – pp. 108.
4. Kopanev, A.S. Tests of Jet Power Compensation System on Electric Locomotive 3ES5K / A.S. Kopanev, P.A. Khripkov, V.M. Volkov, P.S. Volt // *Bulletin of All-Russian Research and Design Insti-*

- tute of Electric Locomotive Production.* – 2010. – No.2. – pp. 14-36.
5. Foshkina, N.V. Use of jet power compensator in electric locomotive 3ES5K / N.V. Foshkina, V.M. Malyshev, I.L. Kozlovsky // *Bulletin of All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Production.* – 2010. – No.2. – pp. 37-42.
6. *Reference Book on Railway Power Supply* / under the editorship of K.G. Markwad. – M.: Transport, 1980. – Vol.1. – pp. 256.
7. Vlasievsky, S.V. *Simulation of Commutation Processes in Electric Locomotive Rectifier-Inverter Converters of Single-phase DC*: monograph / S.V. Vlasievsky. – Khabarovsk: Publishing House of FESUC, 2001. – pp. 138.
8. Kabalyk, Yu.S. *Voltage Higher Harmonics Decrease in Traction Network of Electrified Railways by Means of Active Filtration*: monograph / Yu.S. Kabalyk. – Khabarovsk: Publishing House of FESUC, 2015. – pp. 128.

Ссылка для цитирования:

Кабалык, Ю.С. Электрические потери в контактной сети железных дорог при эксплуатации электровозов переменного тока / Ю.С. Кабалык, С.А. Шухарев, Д.Ю. Дроголов // *Вестник Брянского государственного технического университета.* – 2019. – № 9. – С.5- - 57. DOI: 10.30987/article\_5d9317b307f835.52624411.

Статья поступила в редакцию 6.09.19

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного  
технического университета  
член редсовета журнала «Вестник БГТУ»

Кобищанов В.В.

Статья принята к публикации 9. 09. 19.

#### Сведения об авторах:

**Кабалык Юрий Сергеевич**, к.т.н., доцент Дальневосточного государственного университета путей сообщения, e-mail: [kabalyk@list.ru](mailto:kabalyk@list.ru).

**Шухарев Сергей Анатольевич**, к.т.н., доцент Дальневосточного государственного университета

**Kabalyk Yury Sergeevich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Far-Eastern State University of Communications, e-mail: [kabalyk@list.ru](mailto:kabalyk@list.ru).

**Shukharev Sergey Anatolievich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Far-Eastern State University of Com-

путей сообщения, e-mail: [ab\\_cd@mail.ru](mailto:ab_cd@mail.ru).

**Дроголов Денис Юрьевич**, аспирант Дальневосточного государственного университета путей сообщения, e-mail: [chesser@yandex.ru](mailto:chesser@yandex.ru).

munications, e-mail: [ab\\_cd@mail.ru](mailto:ab_cd@mail.ru).

**Drogolov Denis Yurievich**, Post graduate student, Far-Eastern State University of Communications, e-mail: [chesser@yandex.ru](mailto:chesser@yandex.ru).