

Арсентьев Г.О.<sup>1</sup>, Арсентьев О.В.<sup>1</sup>, Крюков А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РОУТЕРОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В настоящее время в электроэнергетике начинают активно применяться технологии интеллектуальных электрических сетей Smart Grid, основанные на управлении потоками электроэнергии, использовании установок распределенной генерации и полупроводниковых преобразовательных устройств, предназначенных для повышения качества электроэнергии и надежности работы электротехнических комплексов. Одна из технологий Smart Grid состоит в создании энергетических роутеров, способных активно влиять на параметры электроэнергии и режимы ее потребления. Они включают в себя специальные трансформаторы и управляемые преобразователи и предназначены для управления энергопотреблением, подключения установок распределенной генерации, обеспечения двухсторонних перетоков энергии. Представлены результаты компьютерного и экспериментального исследования энергетических роутеров с высокочастотными трансформаторами, предназначенными для интеллектуальных систем электроснабжения. Рассмотрены вопросы повышения качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железных дорог путем использования энергетических роутеров. Получены результаты, подтверждающие возможность применения энергетических роутеров для электроснабжения объектов железнодорожного транспорта с повышенными требованиями к качеству электроэнергии. На основе компьютерных исследований показано, что использование интеллектуальных элементов в системах электроснабжения нетяговых потребителей позволяет решать задачи по повышению качества и надежности энергообеспечения объектов железнодорожного транспорта. Использование энергетических роутеров для электроснабжения ответственных потребителей дает возможность полностью снять проблемы с качеством электроэнергии. Разработанная модель энергетического роутера может применяться для анализа режимов систем электроснабжения, оснащенных этими устройствами. Результаты экспериментальных исследований работы высокочастотного трансформатора подтвердили его соответствие расчетным параметрам. Эффект применения таких трансформаторов в электротехнических комплексах потребителей приводит к значительному снижению массогабаритных показателей. Измерения показали, что высокочастотный трансформатор полностью соответствует расчетным данным: импульсы напряжений имеют четко выраженный прямоугольный характер, сигнал передается через магнитопровод без искажений по форме и углу фазового сдвига, частота составила 12,07 кГц.

**Ключевые слова:** электротехнические комплексы систем электроснабжения железных дорог, энергетический роутер, высокочастотный трансформатор, моделирование, качество электроэнергии.

### ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт имеет развитую инфраструктуру, связанную единым технологическим процессом и включающую в себя подвижной состав, путевое хозяйство, тяговые сети, ремонтные предприятия и т.д. Системы электроснабжения (СЭС) железных дорог переменного тока имеют специфику, обусловленную тем, что энергообеспечение тяги поездов и стационарных объектов инфраструктуры осуществляется единой СЭС. Это приводит к значительному ухудшению качества электроэнергии, поступающей на электротехнические комплексы (ЭК) нетяговых потребителей.

Существует ряд технических решений, направленных на снижение влияния тяговой нагрузки на работу ЭК остальных потребителей, получающих питание от СЭС железных дорог. Однако общего решения проблемы нет, так как каждая из предлагаемых мер имеет узконаправленный характер и позволяет уменьшать искажение качества электроэнергии (ЭЭ) по одному из показателей. Например, симметрирующие трансформаторы дают возможность снижать несимметрию напряжений, а активные и пассивные фильтры гармоник позволяют уменьшать несинусоидальность кривых токов и напряжений в системах электропитания ЭК.

В настоящее время в электроэнергетике начинают

использоваться технологии smart grid, основанные на интеллектуальном управлении потоками электроэнергии, использовании установок распределенной генерации и полупроводниковых преобразовательных устройств, предназначенных для повышения качества ЭЭ и надежности работы СЭС и ЭК потребителей [1-3].

Одна из технологий Smart Grid состоит в создании энергетических роутеров (ЭР), представляющих собой специальные ЭК, способные активно влиять на параметры электроэнергии и режимы ее потребления [4-6]. Они включают в себя специальные трансформаторы и управляемые преобразовательные устройства [7-11] и предназначены для организации управляемого энергопотребления, подключения установок распределенной генерации, обеспечения двухсторонних перетоков энергии.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РОУТЕРЫ

Для решения проблемы качества энергии в сетях, питающих нетяговые потребители с повышенными требованиями к качеству ЭЭ, можно эффективно использовать ЭР, обеспечивающие практически синусоидальное напряжение со стабильным действующим значением и отсутствием несимметрии. Современная элементная база силовой электроники позволяет создавать преобразовательные устройства, надежно работающие в сетях высокого напряжения, способных коммутировать большие токи и выполнять высокочастотные переключения. Мощность ЭР сопоставима

с аналогичным параметром для силовых трансформаторов, применяемых в сетях 10/0,4 кВ, и может достигать 2,5–3 МВ·А.

В состав ЭР входят следующие элементы:

- входной высоковольтный выпрямитель;
- инвертор 1, формирующий высокочастотные импульсы прямоугольной формы с частотой 5...15 кГц;
- высокочастотный трансформатор с магнитопроводом из листовой электротехнической стали для частоты до 6 кГц или из ферритов для больших частот;
- выходной управляемый выпрямитель;
- инвертор 2, формирующий выходное напряжение промышленной частоты практически синусоидальной формы, выполненный, например, по резонансному принципу.

На рис. 1 представлены схемы ЭР с высокочастотным трансформатором [3, 8], мощностью 3 МВ·А.

Для роутеров малой и средней мощности в высокочастотном инверторе используются полевые Mosfet-транзисторы, которые обладают хорошими динамическими характеристиками, позволяющими использовать их в ЭК с частотой до 100 кГц. Рабочая частота таких ЭР составляет примерно 20 кГц. Однако эти полупроводниковые элементы имеют ограничения по величине пропускаемого тока.

В высокочастотном инверторе рассматриваемого ЭР используются биполярные IGBT-транзисторы, способные коммутировать токи выше 1 кА. Эффективное применение такого транзистора ограничено частотой переключений в 5 кГц, при которой потери находятся в допустимых пределах, обеспечивающих КПД преобразования выше 90%.

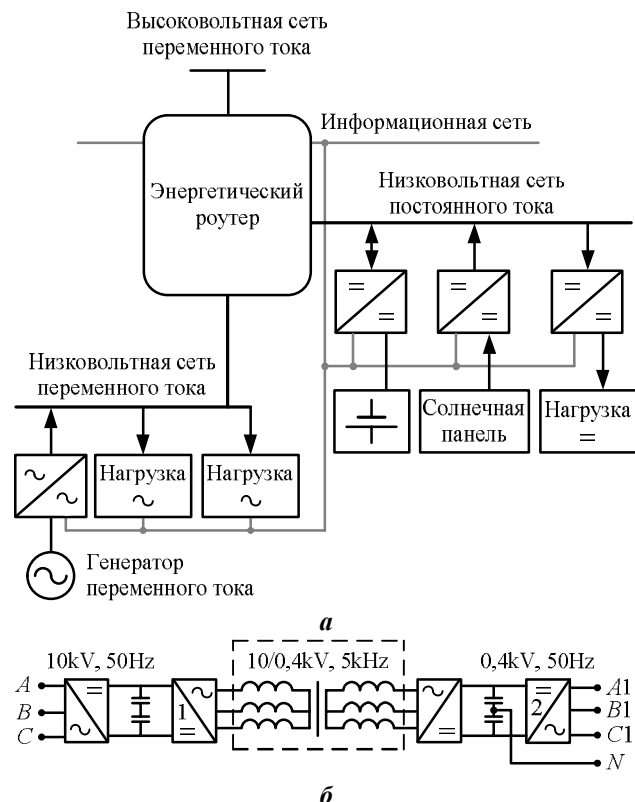


Рис. 1. Энергетический роутер:  
а – схема СЭС с энергетическим роутером;  
б – схема роутера, построенного на основе твердотельного трансформатора

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭР

На основе схемы, показанной на рис. 1, разработана модель ЭР в среде Matlab-Simulink. Модель имеет два выпрямителя в высоковольтной и низковольтной частях схемы и два инвертора, предназначенных для получения импульсов частотой 5 кГц и выходного напряжения 50 Гц (рис. 2). Модель ЭР выполнена в виде подпрограммы, которую можно интегрировать в любую модель СЭС. Ниже представлены результаты исследования СЭС железной дороги, где ЭР используется для подачи качественной электроэнергии на ЭК нетяговых потребителей.

В представленной схеме имеется модель трехобмоточного тягового трансформатора, вторичные обмотки которого служат для подачи энергии на электроподвижной состав и на ЭК нетяговых потребителей. Мощность нагрузки для ЭР составляет 2,24 МВ·А при  $\cos\varphi=0,89$ . Исследования проводились при отключенном и включенном ЭР.

На рис. 3 представлены результаты моделирования для отключенного ЭР, при этом наблюдается значительная несимметрия и несинусоидальность: коэффициент несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  равен 5,3 при предельно допустимом значении 4; суммарный коэффициент гармоник  $k_U$  равен 6,6 при нормально допустимом значении, не превышающем 5.

Работа ЭР характеризуется графиками напряжений (рис. 4) на обмотках высокочастотного трансформатора.

На рис. 5 представлены графики изменения напряжений, поступающих на электроустановки потребителя через ЭР.

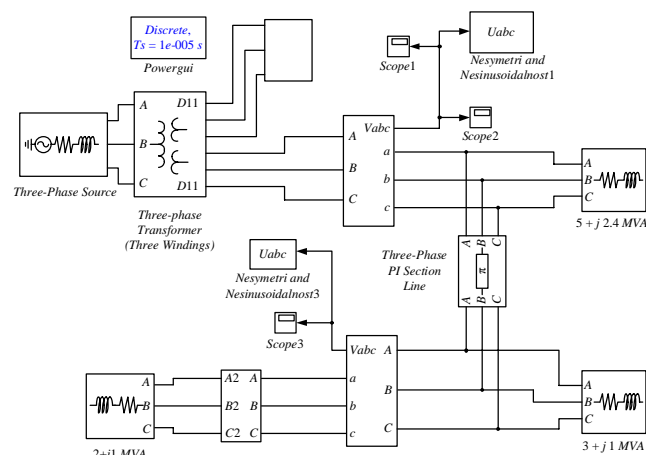


Рис. 2. Модель энергетического роутера

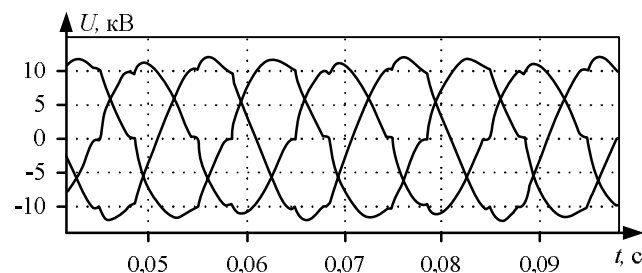


Рис. 3. Напряжение и параметры качества электроэнергии нетягового потребителя без ЭР

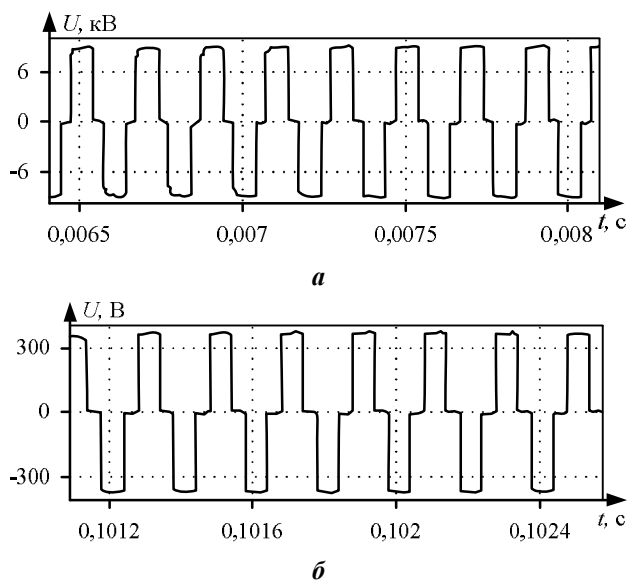


Рис. 4. Напряжения на высокочастотном трансформаторе, со стороны 10 и 0,4 кВ

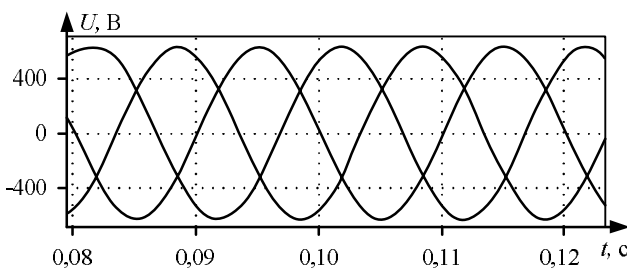


Рис. 5. Напряжение и параметры качества электроэнергии нетягового потребителя при наличии ЭР

Напряжение, подаваемое потребителю, имеет практически синусоидальную форму с частотой 50 Гц и стабильной амплитудой, несимметрия и несинусоидальность практически отсутствуют.

#### РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Наименее изученным сегментом ЭР, требующим конструкторской и экспериментальной проработки, является блок высокочастотного трансформатора, определяющего работоспособность и массогабаритные показатели энергоузел. Конструкции выпрямителей и инверторов достаточно хорошо апробированы и могут без значительных вариаций использоваться в составе ЭР. Возможность технической реализации высокочастотного трансформатора экспериментально проверена на базе преобразователя, разработанного ООО «Транс-Атом» для блока питания электронных устройств по заказу Кубинской железной дороги (Ferrocarriles de Cuba).

Принцип действия преобразователя основан на двойном преобразовании электрической энергии. Сначала сетевое трёхфазное напряжение поступает на мостовой выпрямитель. Затем выпрямленное напряжение с помощью мостового однофазного инвертора на Mosfet-транзисторах преобразуется в переменное напряжение частотой до 15 кГц с прямоугольной формой кривой. Далее напряжение подаётся на первичную обмотку силового трансформатора. К вторичной обмотке подключается нагрузка.

Регулирование эффективного значения напряжения на нагрузке производится платой управления за счёт изменения скважности импульсов на выходе силового инвертора. На рис. 6 представлен внешний вид высокочастотного блока, а на рис. 7 показано фото центральной части экспериментальной установки. Общий вид экспериментальной установки включает в себя объект исследований и измерительный прибор – осциллограф Tektronix TPS 2024B, позволяющий получать точные значения частоты, что является важным при регулировании эффективного напряжения. Для получения результатов, совместимых с компьютерной обработкой, использовался цифровой осциллограф Hantek DSO-2090.

Нагрев обмоток определяется плотностью тока в проводах, максимальное значение которой принято на основании практического опыта равным  $3,2 \text{ А/мм}^2$ . Расчет трансформатора проводился из условия работы магнитной системы на линейном участке характеристики намагничивания. По технологическим условиям диапазон изменения частоты находился в пределах 10–15 кГц. Для обеспечения высокоточного регулирования лучшая настройка частоты обеспечивалась при линейных характеристиках, при этом определяющим фактором являлся выбор величины магнитной индукции, зависящей от свойств материала магнитопровода.

При проектировании трансформатора необходимо было обеспечить возможность размещения обмоток в окне сердечника магнитопровода. Рекомендованное значение коэффициента заполнения окна медью  $K_m$  для каркасных броневых или стержневых сердечников составляет 0,45. При широких каркасах и большой длине намотки одного слоя значение  $K_m$  может доходить и до 0,5–0,55, как, например, у магнитопроводов типа Б69 и Б35. При бескаркасной промышленной намотке  $K_m$  может достигать 0,6–0,65. Теоретический предел значения  $K_m$  для слоевого размещения круглого провода в квадратном окне составляет 0,87.

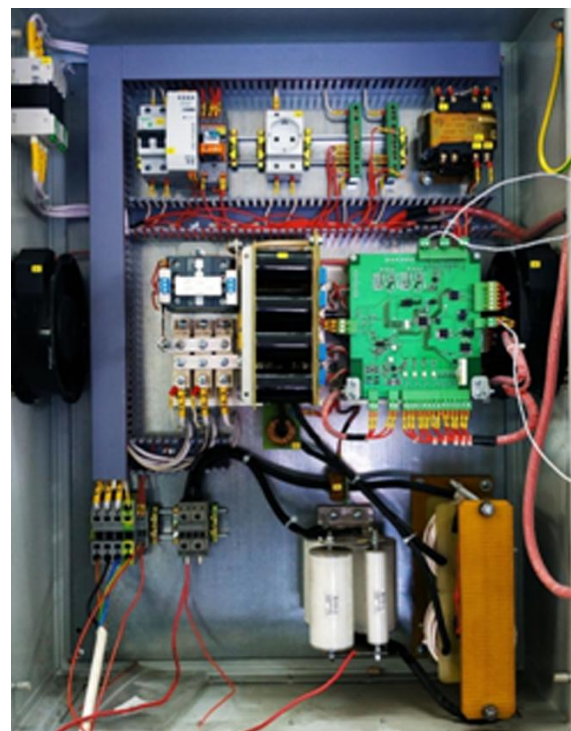


Рис. 6. Высокочастотный блок питания

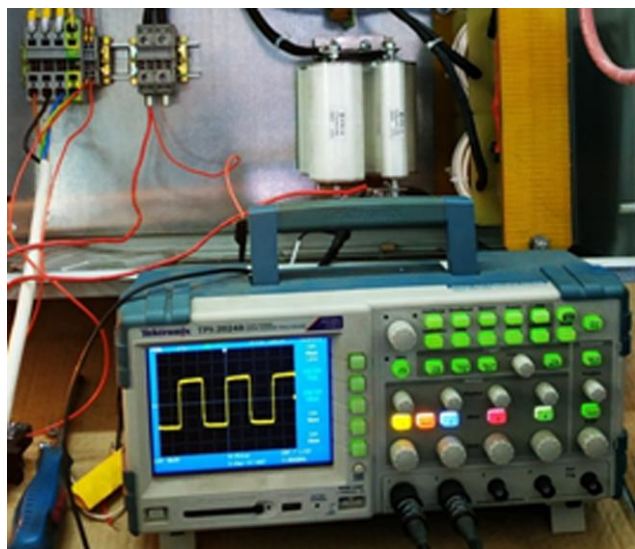


Рис. 7. Экспериментальная установка

Приведенные значения  $K_m$  достижимы лишь при ровной укладке провода строго виток к витку, тонкой межслойной и межобмоточной изоляции и заделке выводов за пределами окна сердечника на боковых вылетах обмотки. При изготовлении каркасных обмоток в условиях лабораторного или опытного производства следует принимать значение  $K_m$  не более 0,3–0,4.

Габаритная мощность трансформатора  $P$ , Вт, определяется по выражению

$$P = \frac{4,44\eta S_c S_o f B j K_m K_c}{100(1 + \eta)},$$

где  $\eta$  – КПД трансформатора, о.е.;  $S_c$  и  $S_o$  – соответственно площади поперечного сечения сердечника и окна, см<sup>2</sup>;  $f$  – нижняя рабочая частота трансформатора, Гц;  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $j$  – плотность тока в проводе обмоток, А/мм<sup>2</sup>;  $K_c$  – коэффициент заполнения сечения сердечника сталью.

При известном напряжении в обмотках количество витков можно рассчитать по формуле

$$n_1 = \frac{U_1 10^4}{4,44 f B S_c K_c},$$

где  $U_1, U_2, U_3, \dots$  – напряжения обмоток, В;  $n_1, n_2, n_3, \dots$  – число витков обмоток.

В табл. 1 приведены основные параметры спроектированного высокочастотного трансформатора.

По приведенным расчетным данным был изготовлен высокочастотный трансформатор, являющийся одним из основных компонентов блока питания. Применение такого трансформатора позволило снизить массогабаритные показатели установки. Это подтверждается сравнением с показателями сухих силовых трансформаторов промышленной частоты, приведенными в табл. 2.

Очевидно, что все представленные в табл. 2 трансформаторы значительно уступают высокочастотному устройству. В зависимости от исполнения массы трансформаторов отличаются более чем в 70 для трехфазных и 48 раз для однофазных. По габаритным показателям отличия составляют от 3 до 6 раз.

Таблица 1  
Результаты расчет трансформатора на феррите N97  
U141/78/30 (B67374G0000X197)

Обозначение	Наименование параметра, единицы измерения	Численное значение
$S_c$	Площадь поперечного сечения сердечника, см <sup>2</sup>	13,65
$S_o$	Площадь окна, см <sup>2</sup>	33,5
$\eta$	КПД, о.е.	0,95
$B$	Магнитная индукция, Тл	0,35
$j$	Плотность тока в проводе обмоток, А/мм <sup>2</sup>	3,2
$K_m$	Коэффициент заполнения окна сердечника медью, о.е.	0,3
$K_c$	Коэффициент заполнения сечения сердечника сталью, о.е.	0,93
$U_1$	Первичное напряжение, В	535
$U_2$	Вторичное напряжение, В	100
$I_1$	Ток в первичной обмотке, А	54
$I_2$	Ток во вторичной обмотке, А	290
$F_1$	Сечение провода в первичной обмотке, мм <sup>2</sup>	16
$F_2$	Сечение провода во вторичной обмотке, мм <sup>2</sup>	90
$G$	Вес, кг	6
–	Габариты, мм (ДхШхВ)	196×84×150
$f$	Частота, кГц	10   12   15
$P$	Рассчитанная мощность, кВт	31   37   46
$n_1$	Число витков в первичной обмотке, ед.	27   23   18
$n_2$	Число витков во вторичной обмотке, ед.	5   4   3

Таблица 2  
Сравнительные характеристики сухих трансформаторов промышленной частоты

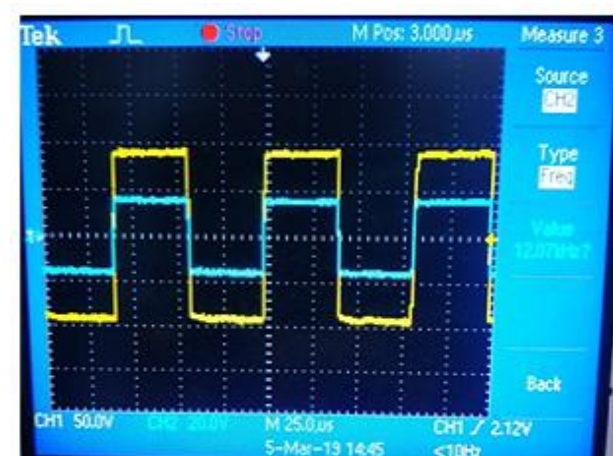
№ п/п	Тип	Габариты, мм	Вес, кг
1	ТС – 25/10	880×520×925	340
2	ТС – 40/10	940×520×985	420
3	ОСУ – 20/0,5	540×420×555	136
4	ОСУ – 40/0,5	740×575×765	283

Исследование работы высокочастотного блока питания проводилось на экспериментальной установке (см. рис. 7) путем осциллографирования сигналов токов и напряжений (рис. 8).

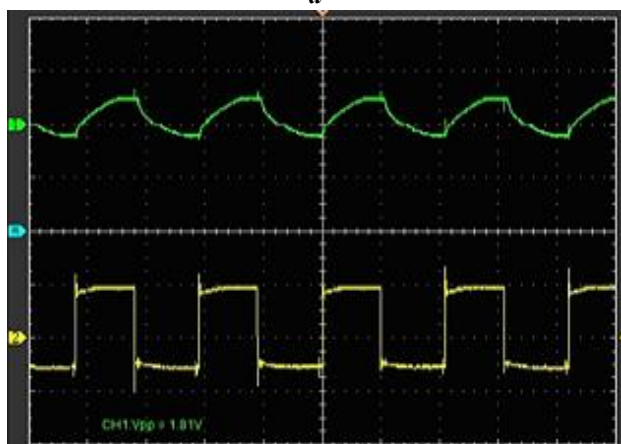
На рис. 8, а показаны результаты экспериментальных исследований по определению характеристик высокочастотного трансформатора: коэффициента трансформации, искажений импульсов, фазовых сдвигов входных и выходных характеристик, частоты преобразования.

Измерения показали, что высокочастотный трансформатор полностью соответствует расчетным данным (см. табл. 1): коэффициент трансформации составил 5,4; импульсы напряжений имеют четко выраженный прямоугольный характер; сигнал передается через магнитопровод без искажений по форме и углу фазового сдвига; частота составила 12,07 кГц.





а



б

**Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований:**  
а – характеристики высокочастотного трансформатора;  
б – токи и напряжения в первичной обмотке

На рис. 8, б приведены совмещенные осциллограммы токов и напряжений на высокой стороне трансформатора. Амплитуда импульсов напряжений составила 550 В при частоте 12,1 кГц. Токовая осциллограмма соответствует по времени импульсам напряжения, амплитудное значение составляет 51 А. Токи и напряжения практически совпадают по фазе, то есть после автоматической подстройки частоты происходит компенсация реактивной мощности и трансформатор включается на чисто активную нагрузку. Получение такого режима работы обосновано формированием жестких выходных характеристик.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование интеллектуальных элементов в СЭС нетяговых потребителей позволяет решать задачи по повышению качества и надежности энергообеспечения объектов железнодорожного транспорта. Использование энергетических роутеров для электроснабжения

ответственных потребителей дает возможность полностью снять проблемы с качеством электроэнергии.

Разработанная модель ЭР может применяться для анализа режимов СЭС, оснащенных этими устройствами.

Результаты экспериментальных исследований работы высокочастотного трансформатора подтвердили его соответствие расчётным параметрам. Эффект применения таких трансформаторов в ЭК потребителей приводит к значительному снижению массогабаритных показателей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smart grid technologies / J. Wang, A.Q. Huang, W. Sung, Y. Liu, B.J. Baliga // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. Vol. 3. No. 2. Pp. 16-23. doi: 10.1109/MIE.2009.932583.
2. Buchholz B.M., Styczynski Z.A.. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p. doi: 10.1002/ente.201402181.
3. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet / Y. Xu, J. Zhang, W. Wang, A. Juneja, S. Bhattacharya // IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). IEEE, 2011. Pp. 31-36. doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340.
4. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet / A.Q. Huang, M.L. Crow., G.T. Heydt, J.P. Zheng, S.J. Dale // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 99. Iss. 1. Pp. 133-148. doi: 10.1109/JPROC.2010.2081330.
5. Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system / R.P. Alzola, G.V. Gohil, L. Mathe, M. Liserre, F. Blaabjerg // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2013. Pp. 380-387. doi: 10.1109/ECCE.2013.6646726.
6. Mao X., Falcones S., Ayyanar R. Energy-based control design for a solid state transformer // Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2010. doi: 10.1109/PES.2010.5590097.
7. Bansode S.G., Joshi P.M. Solid state transformers: new approach and new opportunity // Proceedings of 11th IRF International Conference. India: Pune, 2014. Pp. 15-21. [https://www.digitalxplore.org/up\\_proc/pdf/84-140299091015-21.pdf](https://www.digitalxplore.org/up_proc/pdf/84-140299091015-21.pdf).
8. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems // International Ural Conference on Green Energy (UralCon). IEEE, 2018. Pp. 143-148. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544289.
9. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Intelligent electrical networks based on controlled energy routers // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2018. doi:10.1109/ICIEAM.2018.8728738.
10. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Арсентьев Г.О. Распределенная генерация и энергетические роутеры в системах электроснабжения железных дорог. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 172 с.
11. Кирюхин Ю.А., Степанов В.С., Аршинов С.А. Проектирование силовых высокочастотных трансформаторов. Москва; Вологда: Инфра-инженерия, 2019. 152 с.

Поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### APPLICATION OF ENERGY ROUTERS IN ELECTROTECHNICAL COMPLEXES OF AC RAILWAYS

Grigori O. Arsentiev

Post-graduate student, Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: arsentev\_1986@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6841-1477>.

Oleg V. Arsentiev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Electric Drive and Electric Transport Department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: arsentievov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2546-5969>.

Andrey V. Kryukov

D. Sc. (Engineering), Professor, Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, Transport Electric Engineering Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: and\_kryukov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>.

Currently, Smart Grid technologies based on energy flow management, the use of distributed generation units and semiconductor converting devices designed to improve the quality of electricity and the reliability of the work of electrical complexes are actively applied in the electric power industry. One of the technologies of Smart Grid is the creation of energy routers that can actively influence the parameters of electricity and its consumption modes. They include special transformers and controlled converters and are designed to manage energy consumption, connect distributed generation units and provide two-way energy flows. The results of a computer and experimental study of energy routers with high-frequency transformers designed for intelligent power supply systems are presented. The issues of improving the quality of electricity in networks of non-traction consumers of railways through the use of energy routers are considered. The results obtained confirm the possibility of using energy routers for power supply of railway facilities with increased requirements for the quality of electricity. On the basis of computer research, it has been shown that the use of intelligent elements in the power supply systems of non-traction consumers allows us to solve problems of improving the quality and reliability of energy supply of railway transport facilities. The use of energy routers for power supply to responsible consumers makes it possible to completely eliminate problems with the quality of electricity. The developed model of an energy router can be used to analyze the modes of power supply systems equipped with these devices. The results of experimental studies of the operation of the high-frequency transformer confirmed its compliance with the calculated parameters. The effect of using such transformers in consumer electrical complexes leads to a significant reduction in overall dimensions. The measurements showed that the high-frequency transformer fully complies with the calculated data: the voltage pulses have a pronounced rectangular character, the signal is transmitted through the magnetic circuit without distortion in shape and phase shift angle, the frequency was 12.07 kHz.

**Keywords:** electrotechnical complexes of railway power supply systems, energy router, high-frequency transformer, modeling, power quality.

#### REFERENCES

1. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart grid technologies. IEEE Industrial Electronics Magazine. Vol. 3. No. 2. Pp. 16-23. doi: 10.1109/MIE.2009.932583.
2. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p. doi: 10.1002/ente.201402181.
3. Xu Y., Zhang J., Wang W., Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet. 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Brussels, Belgium. 2011. pp. 31-36. doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340.
4. Huang A.Q., Crow M.L., Heydt G.T., Zheng J.P., Dale S.J. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet Proceedings of the IEEE. Vol. 99. No. 1. pp. 133-148. doi: 10.1109/JPROC.2010.2081330.
5. Alzola R.P., Gohil G.V., Mathe L., Liserre M., Blaabjerg F. Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA. 2013. Pp. 380-387. doi: 10.1109/ECCE.2013.6646726.
6. Mao X., Falcones S., Ayyanar R. Energy-based control design for a solid state transformer. IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA. 2010. Pp. 1-7, doi: 10.1109/PES.2010.5590097.
7. Bansode S.G., Joshi P.M. Solid state transformers: new approach and new opportunity // Proceedings of 11th IRF International Conference. India: Pune, 2014. Pp. 15-21. [https://www.digitalxplore.org/up\\_proc/pdf/84-140299091015-21.pdf](https://www.digitalxplore.org/up_proc/pdf/84-140299091015-21.pdf).
8. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems. 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, Russia. 2018. Pp. 143-148. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544289.
9. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Intelligent electrical networks based on controlled energy routers. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, Russia. 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728738.
10. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. *Raspredeleniye generatsiya i energeticheskie routery v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Distributed generation and power routers in railway power supply system]. Moscow, Berlin, Direct Media Publ., 2019. 172 p. (in Russian)
11. Kiryukhin Yu.A., Stepanov V.S., Arshinov S.A. *Proektirovaniye silovykh vysokochastotnykh transformatorov* [Design of power high-frequency transformers]. Moscow, Vologda, Infra-engineeriya Publ., 2019. 152 p. (in Russian)

Арсентьев Г.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В. Применение энергетических роутеров в электротехнических комплексах железных дорог переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 10-15. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-10-15](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-10-15)

Arsentiev G.O., Arsentiev O.V., Kryukov A.V. Application of Energy Routers in Electrotechnical Complexes of AC Railways. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 10-15. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-10-15](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-10-15)