

УДК 621.314.261

**Л.Э. Рогинская, А.Р. Латыпов, А.А. Меднов, А.Х. Минияров**Уфимский государственный авиационный технический университет,  
Уфа, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ УСТРОЙСТВ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

В статье рассмотрены преимущества применения многофункциональных трансформаторов в электротехнологических установках, включающих индукционный нагрев. С целью улучшения электромагнитной совместимости проведен комплексный анализ работы магнитополупроводникового преобразователя частоты для электротехнологии. Приводятся применяющиеся в настоящее время возможные варианты полупроводниковых преобразователей частоты на базе автономных инверторов напряжения и тока, а также резонансных инверторов для электротехнологических установок, включающих индукционный нагрев. Указанные инверторы могут быть выполнены на элементной базе как тиристоров, так и транзисторов. Обоснована возможность применения аморфных сталей в магнитопроводах многофункциональных трансформаторов с целью снижения потерь в преобразователе частоты. На примере разработанной имитационной модели устройства индукционного нагрева, в состав которого включен многофункциональный трансформатор, позволяющий умножить частоту выходного напряжения в 2 и 4 раза, обоснована целесообразность применения многофункциональных трансформаторов вместо согласующих трансформаторов в качестве устройств обеспечения электромагнитной совместимости. Кроме того, с помощью моделирования подтверждена возможность использования многофункционального трансформатора в качестве регулятора выходных параметров электротехнологических установок, включающих индукционный нагрев. В дополнение ко всем вышеперечисленным преимуществам в преобразователях с каскадным включением трансформаторов сохраняются все преимущества гальванической развязки сетей. Практическая значимость исследования заключается в повышении энергетической эффективности электроустановки за счет уменьшения потерь на гистерезис в магнитопроводе из аморфной стали и коммутационных потерь в полупроводниковом преобразователе, а также в возможности регулирования выходных параметров электротехнологической установки в процессе индукционного нагрева.

**Ключевые слова:** многофункциональный трансформатор, устройство для индукционного нагрева, ферромагнитный множитель частоты.

**L.E. Roginskaya, A.R. Latypov, A.A. Mednov, A.Kh. Miniyarov**

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

## **THE RESEARCH OF MULTIFUNCTIONAL TRANSFORMERS USING AS DEVICES FOR SECURITY ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY**

This article describes the advantages of using multi-functional transformers of electro installations, including induction heating. In order to improve EMC conducted a comprehensive analysis of the magnetic semiconductor frequency converter for electrotechnology. Drives use today possible options for semiconductor frequency converters on the basis of the autonomous inverter voltage and current, as well as resonant inverters for electro-technological systems, including induction heating. These inverters can be performed on a component base thyristors and transistors. The possibility of application of amorphous steel in the magnetic multifunctional transformers to reduce losses in the frequency converter. The example provided by the developed simulation model of induction heating device, which is included in the multi-transformer, allows multiplication of the output voltage frequency of 2 to 4 and times, proved the feasibility of multi-functional transformers instead of matching transformers as electromagnetic compatibility of devices. Furthermore, by simulation confirmed the possibility of using a transformer as a multifunctional regulator output parameters electrotechnological installations comprising induction heating. In addition, all the advantages of galvanic decoupling networks are saved to all of the above benefits to converters with cascaded transformers. The practical significance of the research is to reduce electrical losses by reducing the hysteresis loss in the magnetic core of amorphous steel and switching losses in the semiconductor converter, and the possibility of adjusting the output parameters of the load during the induction heating.

**Keywords:** multifunctional transformer, the induction-heating device, ferromagnetic frequency multiplier.

**Введение.** Устройства индукционного нагрева в период бурного развития промышленного производства приобрели значительную популярность для процессов закалки, пайки, плавки, сварки, нагрева перед пластической деформацией или горячей посадкой (съемом) машиностроительных деталей и их соединений, нанесения защитных и декоративных покрытий и др. [1, 2, 3]. Однако питание индукторно-преобразовательных модулей затрудняется ввиду особенностей нагрузки. Эти особенности заключаются в нелинейном характере параметров в процессе нагрева. В этом случае важную роль начинает играть вопрос об электромагнитной совместимости нагрузки с сетью. Рассогласование влечет за собой снижение эффективности устройства индукционного нагрева. Поэтому в процессе перечисленных технологических операций особенно важно обеспечивать электромагнитную совместимость трансформаторно-преобразовательного модуля с сетью [4, 5].

**Основная часть.** В самом простом случае источники питания для устройств индукционного нагрева включают в себя блок выпрямителей и один из видов автономного инвертора: тока (АИТ), напряжения (АИН) или резонансного инвертора [6, 7]. Но данная структура в последнее время подвергается широкой критике, так как она имеет целый ряд недостатков, среди которых сложность регулирования, высокие коммутационные потери, отсутствие гальванической развязки и трудность согласования с нагрузкой.

Одним из способов решения проблемы электромагнитной совместимости является каскадное включение блока выпрямителей, инвертора, специального трансформатора и нагрузки. Такое подключение позволяет не только согласовать параметры, но и осуществить гальваническую развязку элементов.

Часто в качестве специального трансформатора используется высокочастотный согласующий трансформатор, также известный как закалочный [2]. Он позволяет не только получать требуемое напряжение в нагрузке путем умножения последнего на величину коэффициента трансформации, но и дополнять нагрузочный контур, учитывая индуктивность трансформатора при выборе индуктивности индуктора [6, 7].

Стоит отметить, что наметилась тенденция на применение данных трансформаторов с сердечниками из аморфных и нанокристаллических сплавов, которые позволяют снизить потери, повысить коэффициент полезного действия (КПД), уменьшить перегрев (рис. 1) [9, 10, 11]. При их использовании возможно повышение частоты выше 10 000 Гц при сохранении индукции насыщения до 1,5 Тл.

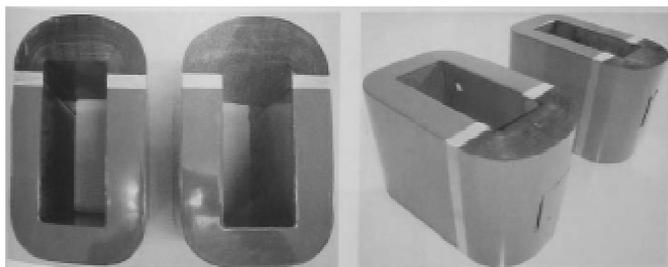


Рис. 1. Однофазные трансформаторы из аморфного сплава

Однако все большую популярность набирает другой вид трансформаторов – многофункциональный трансформатор, также более известный как ферромагнитный умножитель частоты. Он сочетает в себе

все преимущества высокочастотного согласующего трансформатора и обладает рядом преимуществ. В их число входят возможности расширения частотного диапазона в 2...9 раз, стабилизации или регулирования выходного напряжения или тока [12, 13, 14]. Простейшая схема ферромагнитного умножителя частоты в 2 раза представлена на рис. 2.

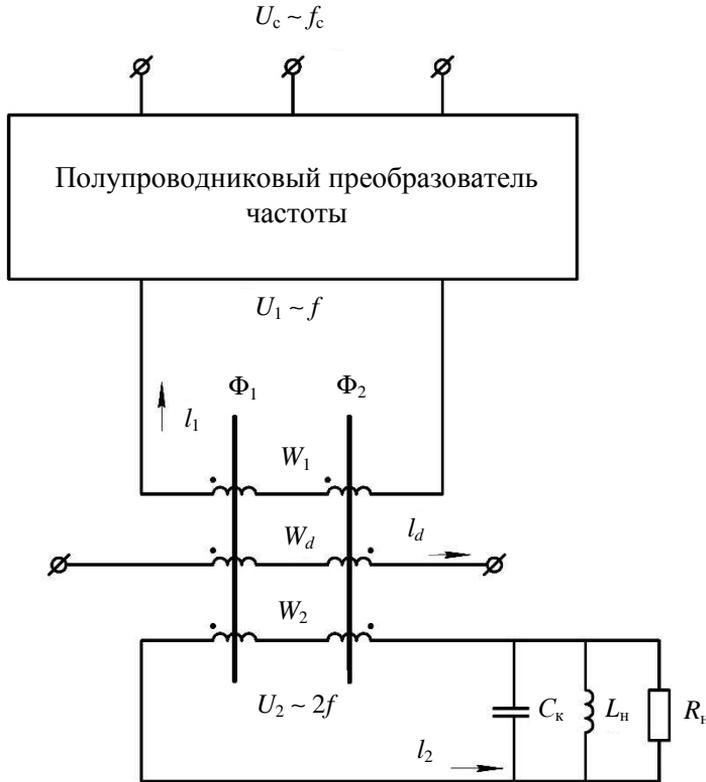


Рис. 2. Ферромагнитный умножитель частоты в 2 раза

Математическая модель ферромагнитного умножителя частоты в 2 раза [8–9]:

$$U_1 = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_2}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = i_2 r_2 + U_C, \quad (1)$$

$$F_1 = i_1 w_1 + i_d w_d + i_2 w_2, \quad (2)$$

$$F_2 = i_1 w_1 - i_d w_d - i_2 w_2, \quad (3)$$

$$U_C = U_H = i_H r_H + L_H \frac{di_H}{dt}, \quad (4)$$

$$i_2 = i_C + i_R + i_L, \quad (5)$$

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt}, \quad (6)$$

$$i_{R(H)} = \frac{U_2}{R}, \quad (7)$$

$$i_{L(H)} = \frac{1}{L} \int U_C dt, \quad (8)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – активные сопротивления числа витков первичной и вторичной обмоток;  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – суммарные потоки в магнитопроводах I и II;  $w_d$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  – число витков обмотки подмагничивания, первичной и вторичной соответственно;  $F_1$ ,  $F_2$  – суммарные МДС магнитопроводов;

$$F_1 + F_2 = 2i_1 w_1, \text{ а } F_1 - F_2 = 2i_2 w_2 + 2i_d w_d.$$

Откуда следует, что в магнитопроводах в один и тот же момент времени происходят разные процессы: в I – МДС магнитопроводов складывается и равняется удвоенной МДС первичной обмотки, а в II – разность МДС в магнитопроводах равняется сумме удвоенных МДС вторичной обмотки и обмотки подмагничивания постоянным током.

Из формул (2) и (3) при  $i_d = 0$  видно, что ещё одним преимуществом ферромагнитного умножителя частоты является возможность использования его в качестве согласующего трансформатора. В случае использования индукционного нагрева для закалки токамаи высокой частоты такое конструктивное преобразование позволит изменить глубину закалённого слоя детали, не прибегая к значительным изменениям конструкции преобразователя частоты.

В последнее время широкий размах набирает имитационное моделирование различных схемотехнических решений в математических пакетах, среди которых выделяется программный комплекс MatLab [15, 16]. Авторами разработаны имитационные модели преобразователей частоты, с помощью которых возможен полный анализ их работы совместно с ферромагнитными умножителями частоты в 2 (рис. 3) и 4 раза (рис. 4). Модель на рис. 3 содержит трехфазный источник напряжения Three-Phase Source, управляемый выпрямитель Universal Bridge, питающий резонансный инвертор напряжения на базе тиристоров. К выводным концам инвертора подключен ферромагнитный ум-

ножитель частоты в 2 раза. Его имитационная модель построена на базе вышеприведенной математической модели с использованием следующих инструментов MatLab Simulink: сумматор Add использован для сложения магнитных потоков в магнитопроводах, блок Look up Table позволяет установить соответствие магнитного потока  $\Phi$  и МДС в сердечнике. Аналогично построена имитационная модель ферромагнитного учетверителя частоты (см. рис. 4). С помощью этих моделей можно наблюдать параметры установки индукционного нагрева в момент коммутации (переходные режимы), в номинальном режиме работы, включая особенности индукционной нагрузки, в нештатных и аварийных режимах.

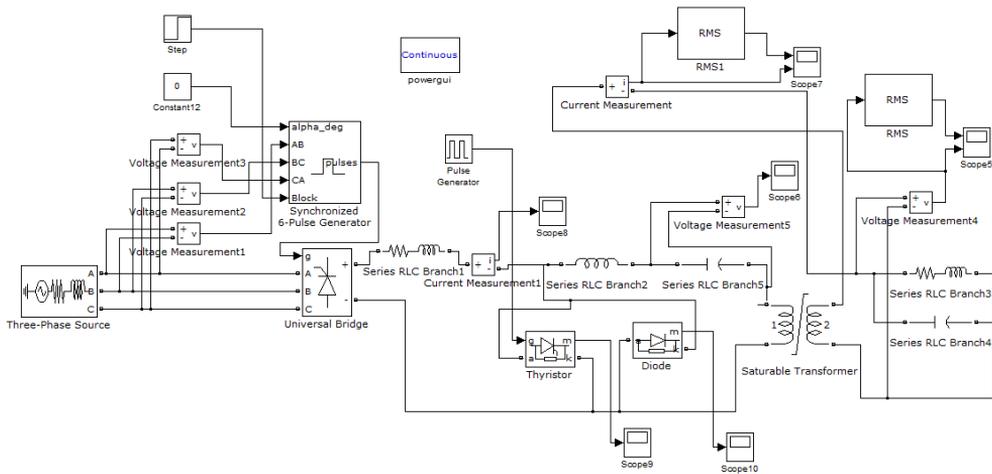


Рис. 3. Имитационная модель электротехнологической установки, включающей индукционный нагрев

По результатам моделирования можно получить все необходимые параметры работы преобразователя с учетом всех изменений нагрузочного контура в процессе индукционного нагрева. Так, например, были получены кривые напряжения на нагрузке при её подключении к ферромагнитному учетверителю частоты (рис. 5). Кривая напряжения имеет выраженный синусоидальный вид и содержит гармонические составляющие. Действующее значение напряжения на нагрузке оказывается равным 400 В при питании установки от трехфазной сети напряжением 380 В, что соответствует параметрам выпускаемых в промышленности электротехнологических установок, включающих индукционный нагрев [6].

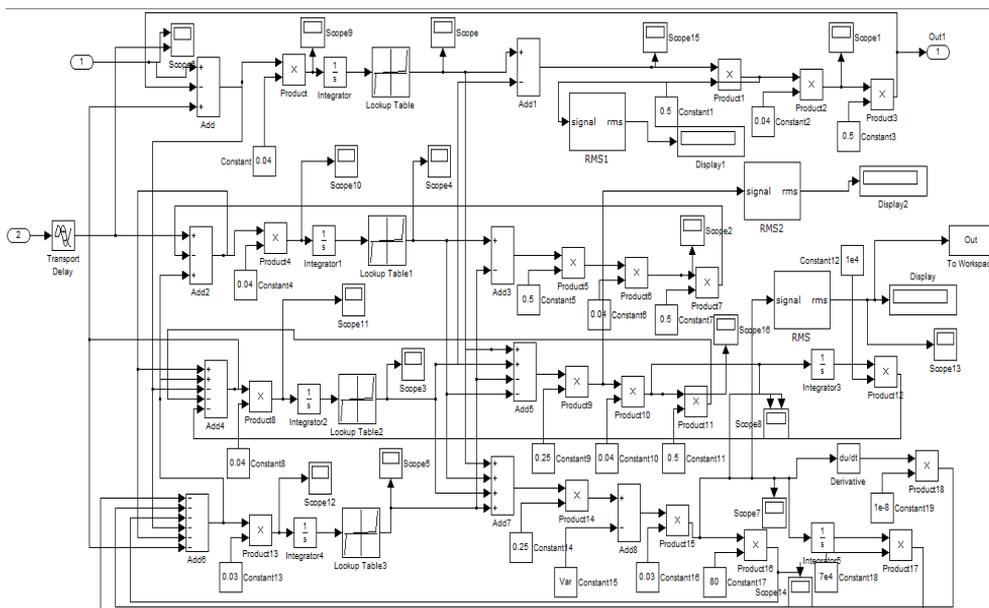


Рис. 4. Имитационная модель ферромагнитного умножителя частоты в 4 раза

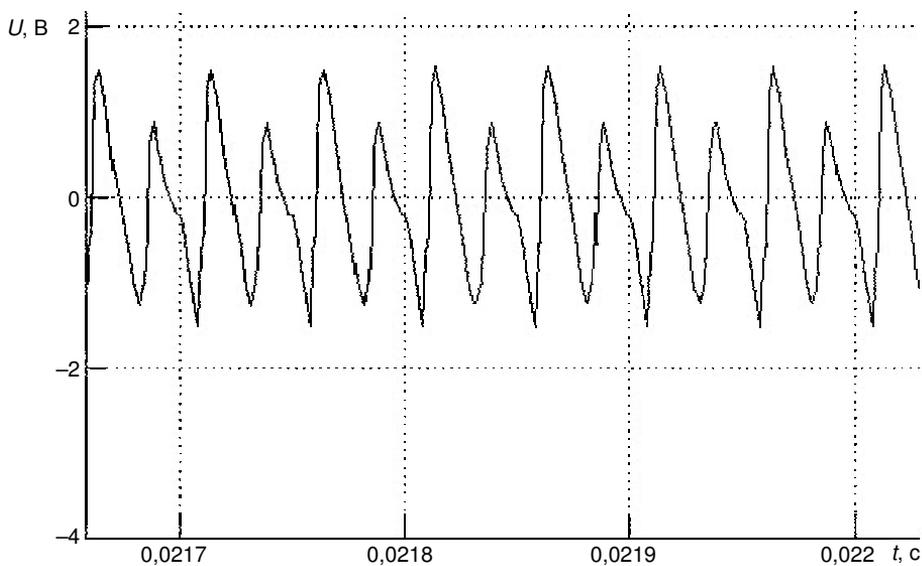


Рис. 5. Кривая напряжения на выводах умножителя частоты в 4 раза

Кроме того, моделированием получены регулировочные характеристики преобразователя частоты (рис. 6). Из них видно, что при постоянном напряжении питания 400 В и постоянной нагрузке, изменяя ток подмагничивания с 50 до 420 А, возможно регулирование то-

ка индуктора в диапазоне 0,6–4,1 А. При напряжении питания 500 В, постоянной нагрузке и аналогичном диапазоне тока подмагничивания допускается регулирование в диапазоне 0,9–5,8 А. Столь широкий диапазон регулирования позволит стабилизировать процесс нагрева при изменении параметров нагрузочного контура и создаст условия для равномерного и более точного по глубине прогрева заготовки, что, в свою очередь, отразится на качестве выполняемой технологической операции.

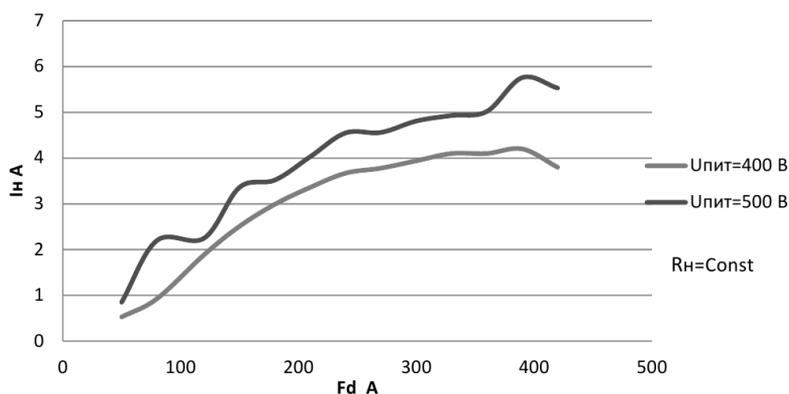


Рис. 6. Регулировочная характеристика многофункционального трансформатора



Рис. 7. Прототип умножителя частоты в 4 раза на основе аморфного сплава 1-СП

С целью подтверждения результатов имитационного моделирования авторами создан экспериментальный образец умножителя частоты в 4 раза, представленный на рис. 7. Образец собран с использованием

аморфной стали марки АМЕТ 1-СР с низкими удельными потерями на перемагничивание и высокой индукцией насыщения. Испытание образца будет проведено по завершении сборки полупроводникового преобразователя частоты.

**Выводы.** Таким образом, электромагнитная совместимость наиболее эффективно достигается с помощью многофункциональных трансформаторов, которые позволяют увеличить диапазон частот в 2...9 раз, при этом не перегружая полупроводниковые элементы инвертора, а также регулировать или стабилизировать ток и напряжение на нагрузке. Не менее важным является уменьшение индуктивности индуктора за счет наличия индуктивности обмотки трансформатора. Особую роль играет гальваническая развязка нагрузки и источника питания, позволяющая защитить преобразователь при коротком замыкании в нагрузке. Перспективным для практического применения является имитационная модель, позволяющая анализировать работу устройства индукционного нагрева во всевозможных режимах, вплоть до короткого замыкания.

### **Библиографический список**

1. Слухоцкий А.Е. Индукторы / под ред. А.Н. Шамова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1989. – 69 с. (Библиотечка высокочастотника-термиста. Вып. 12).
2. Гайнетдинов Т.А. Индукторно-трансформаторный комплекс для высокочастотной термообработки материалов (разработка и исследование): автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03. – Уфа, 2010. – 19 с.
3. Steel heat treatment: equipment and process design / G.E. Totten [et al.]; ed. by G.E. Totten. – Boca Raton [et al.]: CRC Press [et al.], 2007. – 714 p.
4. Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике в вопросах и ответах: учеб. пособие. – Уфа: Изд-во Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 2005. – 85 с.
5. Рогинская Л.Э., Исмагилов Р.Р., Рахманова Ю.В. Согласование выходных параметров инвертора для индукционного нагрева с параметрами нагрузки с помощью ферромагнитного умножителя частоты // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 2, т. 9.
6. Тиристорные преобразователи частоты / А.К. Белкин, Т.П. Костюкова, Л.Э. Рогинская, А.А. Шуляк. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 263 с.

7. Лавлесс, Дон Л. Обзор полупроводниковых источников питания для индукционного нагрева / пер. Ю.И. Болтовский, Г.И. Таназлы // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 73–76.

8. Ферромагнитные умножители частоты / А.М. Бамдас, И.В. Блинов, Н.В. Захаров, С.В. Шапиро. – М.: Энергия, 1968. – 176 с. (Сер. Трансформаторы. Вып. 18).

9. Гаммамет-продукция [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gammamet.ru/ru/production.htm> (дата обращения: 12.12.2016).

10. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. ун-та им. А.М. Горького, 2002. – 384 с.

11. Стародубцев, Ю.Н., Белозеров В.Я. Аморфные металлические материалы // Силовая электроника. – 2009. – № 2. – С. 35–40.

12. Рогинская Л.Э., Исмагилов Р.Р., Рахманова Ю.В., Расширение частотного диапазона полупроводниковых преобразователей частоты для электротехнологических установок, включающих индукционный нагрев, с помощью многофункциональных трансформаторов // Вестник Чуваш. ун-та. – 2015. – № 1. – С. 96–103.

13. Рогинская Л.Э., Исмагилов Р.Р. Многофункциональные силовые трансформаторные модули // Электронные устройства и системы: межвуз. сб. – Уфа: Изд-во Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 2008. – С. 54–58.

14. Меднов А.А., Минияров А.Х. Расширение частотного диапазона при каскадном соединении полупроводникового умножителя частоты и многофункционального трансформатора // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. (с междунар. участ.). – Уфа: Изд-во Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 2016. – С. 402–405.

15. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

16. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

## References

1. Slukhotskii A.E. Induktory [Inductors]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie, 1989. 69 p. (Bibliotekha vysokochastotnika-termista, iss. 12).
2. Gainetdinov T.A. Induktorno-transformatornyi kompleks dlia vysokochastotnoi termoobrabotki materialov (razrabotka i isseledovanie) [The inductor-transformer system for high frequency treatment of materials (development and research)]. Abstract of the Thesis of the Candidate of Technical Sciences: 05.09.03. Ufa, 2010. 19 p.
3. Totten G.E. [et al.]. Steel heat treatment: equipment and process design. CRC Press [et al.], 2007. 714 p.
4. Ismagilov F.R., Maksudov D.V. Elektromagnitnaia sovmestimost' v elektroenergetike v voprosakh i otvetakh [Electromagnetic compatibility in power engineering questions and answers]. Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 2005. 85 p.
5. Roginskaia L.E., Ismagilov R.R., Rakhmanova Iu.V. Soglasovanie vykhodnykh parametrov invertora dlia induktsionnogo nagreva s parametrami nagruzki s pomoshch'iu ferromagnitnogo umnozhitelia chastoty [Matching of output parameters inverter for induction heating load parameters using ferromagnetic frequency multiplier]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2013, no. 2, vol. 9.
6. Belkin A.K., Kostiukova T.P., Roginskaia L.E., Shuliak A.A. Tiristornye preobrazovateli chastoty [Thyristor frequency converters]. Moscow: Energoatomizdat, 2000. 263 p.
7. Lavless, Don L. Obzor poluprovodnikovyykh istochnikov pitaniia dlia induktsionnogo nagreva [Review of semiconductor power supplies for induction heating]. *Silovaia elektronika*, 2007, no. 4, pp. 73-76.
8. Bamdas A.M., Blinov I.V., Zakharov N.V., Shapiro S.V. Ferromagnitnye umnozhiteli chastoty [Ferromagnetic frequency multipliers]. Moscow: Energiia, 1968. 176 p. (Seriiia "Transformatory", iss. 18).
9. Gammamet-produktsiia [Gammamet production], available at: <http://www.gammamet.ru/ru/production.htm> (accessed 12 December 2016).
10. Starodubtsev Iu.N., Belozarov V.Ia. Magnitnye svoistva amorfnykh i nanokristallicheskikh splavov [The magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys]. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi universitet imeni A.M. Gor'kogo, 2002. 384 p.

11. Starodubtsev, Iu.N., Belozеров V.Ia. Amorfnye metallicheskie materialy [Amorphous metal materials]. *Silovaiia elektronika*, 2009, no. 2, pp. 35-40.

12. Roginskaia L.E., Ismagilov R.R., Rakhmanova Iu.V., Rasshirenie chastotnogo diapazona poluprovodnikovyykh preobrazovatelei chastoty dlia elektrotekhnologicheskikh ustanovok, vkluchaiushchikh induktsionnyi nagrev, s pomoshch'iu mnogofunktsional'nykh transformatorov [Expansion of the frequency range of semiconductor frequency converters for electrotechnological systems, including induction heating, using a multi-functional transformers]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 96-103.

13. Roginskaia L.E., Ismagilov R.R. Mnogofunktsional'nye silovye transformatornye moduli [Multifunction power transformer modules]. *Mezhvuzovskii sbornik "Elektronnye ustroystva i sistemy"*. Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 2008, pp. 54-58.

14. Mednov A.A., Miniiarov A.Kh. Rasshirenie chastotnogo diapazona pri kaskadnom soedinenii poluprovodnikovogo umnozhitelia chastoty i mnogofunktsional'nogo transformatora [Expansion of the frequency range for cascaded semiconductor frequency multiplier and a multifunctional transformer]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov (s mezhdunarodnym uchastiem) "Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov"*. Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 2016, pp. 402-405.

15. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK-Press; Saint Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

16. German-Galkin S.G. Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MatLab 6.0 [Computer modeling of semiconductor systems in MatLab 6.0]. Saint Petersburg: Korona Print, 2001. 320 p.

### **Сведения об авторах**

**Рогинская Любовь Эммануиловна** (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета (450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса 12, e-mail: roginskaya36@mail.ru).

**Латыпов Айдар Рифович** (Уфа, Россия) – аспирант Уфимского государственного авиационного технического университета (452633, д. Изимка, ул. Степная, 4, e-mail: aidarlat@gmail.com).

**Меднов Антон Александрович** (Уфа, Россия) – аспирант Уфимского государственного авиационного технического университета (452170, п. Чишмы, ул. Парковая, 11, e-mail: mednov333@rambler.ru).

**Минияров Айбулат Халыфович** (Уфа, Россия) – аспирант Уфимского государственного авиационного технического университета (452159, д. Новоусманово, ул. Новая, 5, e-mail: zi.zd@mail.ru).

### **About the authors**

**Roginskaya Lyubov Emmanuilovna** (Ufa, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Electromechanics Ufa State Aviation Technical University (450008, Ufa, 12, Karl Marks Str., e-mail: roginskaya36@mail.ru).

**Latipov Aydar Rifovich** (Ufa, Russian Federation) is a Graduate Student of Ufa State Aviation Technical University (452170, Chishmy, 11, Parkovaya Str., e-mail: aidarlat@gmail.com).

**Mednov Anton Alexandrovich** (Ufa, Russian Federation) is a Graduate Student of Ufa State Aviation Technical University (452633, Izimka, 4, Stepnaya Str., e-mail: mednov333@rambler.ru).

**Miniyarov Aibulat Khalyafovich** (Ufa, Russian Federation) is a Graduate Student of Ufa State Aviation Technical University (452159, Novousmanovo, 5, Novaya Str., e-mail: zi.zd@mail.ru).

Получено 16.02.2017