
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.314.263

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_72

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

Л.Э. Рогинская

Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия

ORCID: 0000-0003-3192-9042 roginskaya36@mail.ru

А.С. Горбунов

Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия

ORCID: 0000-0002-5047-666X freizer-anton@yandex.ru

А.А. Меднов

Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия

ORCID: 0000-0002-1128-2408 antonkind@inbox.ru

Описана структура источника питания электротехнологической установки, включающей индукционный нагрев. В типовом варианте она состоит из трех основных блоков: управляемого или неуправляемого полупроводникового выпрямителя, автономного инвертора тока или напряжения, либо резонансного инвертера и устройства для согласования с нагрузкой – согласующего или многофункционального высокочастотного трансформатора. Особое внимание в этой структуре уделяется многофункциональному трансформатору, позволяющему кратно увеличивать частоту выходного напряжения, совмещая при этом функции согласующего трансформатора по согласованию выходного напряжения или тока источника питания. Кроме того, многофункциональный трансформатор является устройством регулирования или стабилизации выходных параметров, не требующим отключения питания электроустановки, и обеспечивающим гальваническую развязку источника питания и нагрузки, и по своей конструкции при этом не требует расширения элементной базы источника питания. Описаны принципы модульного использования многофункциональных трансформаторов для кратного увеличения в 2^n раз выходных частот источников питания. Приведен ряд ключевых преимуществ, получаемых при совместной работе полупроводниковых и ферромагнитных преобразователей частоты

в источнике питания. Также приведены полученные путем аппроксимации по методу Бесселя математические модели, позволяющие описать процессы намагничивания магнитопроводов в основных режимах работы многофункциональных трансформаторов (режим холостого хода и режим нагрузки) с умножением частоты в 2 и 4 раза, а также выполнить расчет его основных параметров: индукция и напряженность магнитного поля в магнитопроводах, выходные токи и напряжения.

Ключевые слова: источник питания электротехнологической установки, метод Бесселя, многофункциональный трансформатор, полупроводниковый преобразователь частоты, умножитель частоты ферромагнитный.

Для цитирования: Рогинская, Л.Э. Преобразователи частоты для электротехнологических процессов, включающих индукционный нагрев / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, А.А. Меднов // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 72-82. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_72

FREQUENCY CONVERTERS FOR INDUCTION HEATING ELECTROTECHNOLOGICAL PROCESSES

L.E. Roginskaya

Ufa State Aviation Technical University

Ufa, Russia

ORCID: 0000-0003-3192-9042 roginskaya36@mail.ru

A.S. Gorbunov

Ufa State Aviation Technical University

Ufa, Russia

ORCID: 0000-0002-5047-666X freizer-anton@yandex.ru

A.A. Mednov

Ufa State Aviation Technical University

Ufa, Russia

ORCID: 0000-0002-1128-2408 antonkind@inbox.ru

Abstract. The article describes an induction heating electrotechnological installation power supply structure. In a typical version, this electrical installation includes three main units: a controlled or uncontrolled semiconductor rectifier, an autonomous current or voltage inverter, or a resonant inverter and a device for matching with the load – a matching or multifunctional high-frequency transformer. Special attention in this structure is paid to a multifunctional transformer that allows to multiply the output voltage frequency, while combining the matching transformer functions to match the output voltage or current of the power supply. In addition, a multifunctional transformer is a device for regulating or stabilizing output parameters that does not require disconnecting the electrical installation

power supply, and provides power supply galvanic isolation from the load, and by its design does not require element base expansion of the power supply. The principles of the multifunctional transformers modular use for a multiple in 2^n times increase of the power supply output frequencies are described. A number of key advantages obtained when working together with semiconductor and ferromagnetic frequency converters in a power supply are presented. The article also presents mathematical models obtained by approximation using the Bessel's method, which allow describing the magnetic cores magnetization processes in the multifunctional transformers main operating modes (idle mode and load mode) with frequency multiplication in 2 and 4 times, as well as calculating its basic parameters, such as magnetic flux density and magnetic field strength in magnetic cores, output currents and voltages.

Keywords: electrotechnological installation power supply, Bessel's method, multifunctional transformer, semiconductor frequency converter, ferromagnetic frequency multiplier.

For citation: L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov and A.A. Mednov, "Frequency converters for induction heating electrotechnological processes", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 72-82, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_72

I. Введение

Электротехнологические установки, основным элементом которых является источник питания, преобразующий трехфазное напряжение промышленной частоты в однофазное напряжение повышенной или высокой частоты, нашли широкое распространение во многих отраслях промышленности, в том числе, в устройствах, включающих индукционный нагрев [1-4]. Широкий диапазон основных выходных параметров – активных мощностей, частот, напряжений – требует создания специализированных источников питания, отличающихся, наряду с перечисленными свойствами, высоким значением КПД (не ниже 90 %) в режимах, близких к номинальным, а также возможностью удобного регулирования перечисленных параметров. На рис. 1 приведена упрощенная схема источника питания с звеном повышенной частоты.

Согласно рис. 1, два первых блока – это выпрямитель и инвертор. Первый блок - выпрямитель, преобразующий трехфазное напряжение промышленной частоты в постоянное напряжение, которое может быть как нерегулируемым, так и регулируемым. Второй блок – инвертор преобразует постоянное напряжение в однофазное переменное напряжение. Имеется много разных схем инверторов, однако в большинстве случаев он представляет собой тиристорное или транзисторное звено высокой частоты, соответствующим образом соединяемое с нагрузкой. Нагрузка, чаще всего, может быть представлена двумя, тремя и четырьмя блоками [5, 6].

В состав третьего блока в настоящее время входит высокочастотный трансформатор, предназначенный для согласования требуемого напряжения нагрузки с выходным напряжением инвертора. Блок управления и защиты служит для формирования заданного алгоритма работы индукционной установки путем формирования структуры управляющих импульсов в различных режимах работы установки.

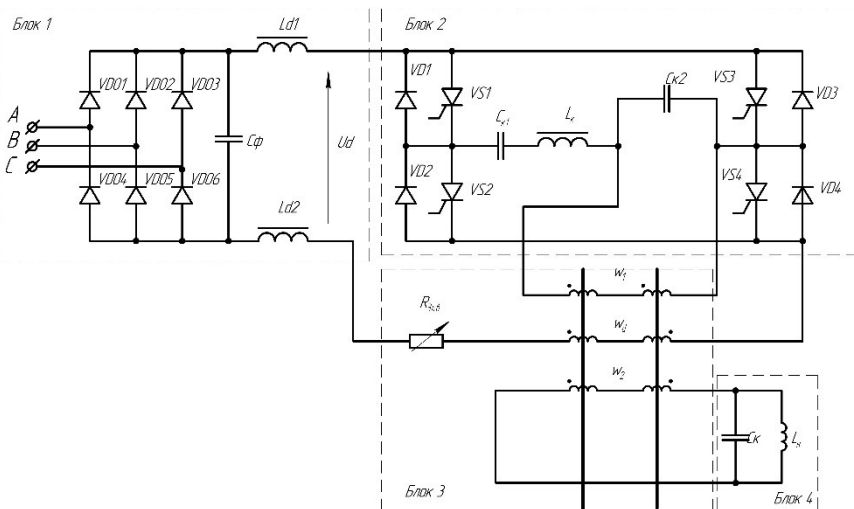


Рис. 1. Схема источника питания с звеном повышенной частоты
Fig. 1. Scheme of a power supply with a high-frequency link

Функции третьего блока рационально расширить, совершенствуя работу установки в целом. Это возможно благодаря применению многофункционального трансформатора, роль которого выполняет ферромагнитный умножитель частоты, подключенный к выходным зажимам инвертора. Данный многофункциональный трансформатор позволяет расширить частотный диапазон полупроводниковых преобразователей в кратное число раз, обеспечить работу установки при нескольких частотах с постоянной структурой инвертора, плавно регулируя выходное напряжение, т.е. обеспечивая согласование параметров инвертора и нагрузки.

Преобразование частоты в многофункциональных трансформаторах осуществляется благодаря нелинейным свойствам их магнитопроводов, определяемым насыщением. Поскольку частота первичного напряжения достаточно высока, насыщение магнитопроводов осуществляется путем поляризации постоянным полем, следовательно, умножение частоты происхо-

дит в четное число раз, и число однофазных насыщающихся трансформаторов кратно двум [7]. В индукционных установках обычно используются умножители частоты в два или в четыре раза [8], однако, в общем случае, частота может увеличиваться в 2^n раз. На рис. 2 приведены схемы многофункциональных преобразователей в 2 и 4 раза. Как видим, число ферромагнитных преобразователей равно 2^{n-1} , причем каждый преобразователь состоит из двух обычных однофазных трансформаторов. Первичные обмотки w_1 этих трансформаторов соединены встречно и подключены к выходным зажимам симметричных полупроводниковых преобразователей. Первичные напряжения изменяются по одинаковому закону и сдвинуты по фазе на угол $2\pi/n$.

Кроме первичных обмоток, имеется еще три: выходная (вторичная) обмотка w_2 , частота напряжения на выходе которой равна $f_2 = f_1 \cdot 2^n$, обмотка подмагничивания постоянным током w_d и обмотки самоподмагничивания w_c , выходная частота которых равна $f_2/2$. Эти обмотки в каждом преобразователе соединены последовательно согласно, а их соединения между преобразователями обеспечивают на выходе обмоток w_2 , w_d напряжение, изменяющееся с частотой f_2 , причем по обмотке подмагничивания протекает постоянный ток I_d , а напряжение на зажимах обмотки w_c изменяется с частотой $f_2/2$. Полупроводниковый преобразователь может иметь трехфазный выход и тогда многофазное первичное напряжение может быть получено соответствующим соединением первичных обмоток многофункционального трансформатора.

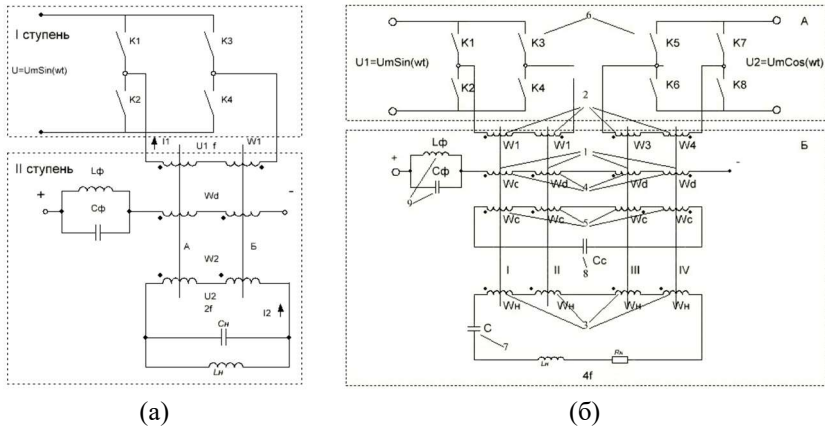


Рис. 2. Схемы многофункциональных преобразователей: с удвоением частоты (а) и с умножением частоты в четыре раза (б)

Fig. 2. Multifunctional converters schemes: with frequency doubling (a) and with frequency multiplication by four times (b)

Как указывалось, для электротермии рационально применять многофункциональные трансформаторы с умножением частоты в два и четыре раза (удвоители и учетверители частоты). Оба преобразователя (рис. 2 а, б) являются частными случаями ферромагнитных преобразователей. В первом случае $n = 1$, во втором $n = 2$. В первом случае достаточно одного инвертора и одного многофункционального преобразователя, во втором – два преобразователя подключены либо к двум одинаковым инверторам, выходные напряжения которых сдвинуты на 90^0 , либо к одному трехфазному инвертору, причем первичные обмотки многофункциональных трансформаторов соединены по Т-образной схеме [9].

Выходное напряжение симметричных инверторов при наиболее благоприятном режиме работы ферромагнитного преобразователя имеет либо прямоугольную, либо синусоидальную форму. При известных величинах первой гармоники магнитной индукции B_{1m} , постоянного тока I_d , а также параметров трех основных конструктивных систем трансформаторов можно определить характеристики преобразователя частоты для электротехнологических процессов, включающих индукционный нагрев. Для вывода выражений, определяющих характеристики ферромагнитного преобразователя, воспользуемся дедуктивным методом научного исследования – приближенным гармоническим анализом с определением гармоник по методу Бесселя [9].

Для расчета аппроксимируем кривую намагничивания трансформаторной стали, например, гиперболическим синусом: $h = \text{arsh}\beta B$, обозначая через $h = h/\alpha$, а через $B = \beta B$, получим, разделяя четные и нечетные составляющие напряженности и индукции магнитного поля:

$$\sum_{k=1}^{2n+1} h_{k1} + \sum_{k=0}^{2n} h_{k2} = \text{sh} \left(\sum_{k=1}^{2n+1} B_{k1} + \sum_{k=0}^{2n} B_{k2} \right). \quad (1)$$

В (1) $n = 0, 1, 2, \dots$ Поскольку многофункциональный преобразователь представляет собой удвоитель или учетверитель частоты, т.е. состоит из двух или четырех трансформаторов, при анализе электромагнитных процессов можно ограничиться гармоническими составляющими не выше четных. Тогда (1) будет иметь вид:

$$F_1 = h_1 + h_3 + h_0 + h_2 + h_4 = \text{sh}(B_1 + B_0 + B_2 + B_4). \quad (2)$$

Для определения четных гармонических составляющих напряженности и индукции получим зависимость между напряженностями и индукциями магнитного поля:

$$F_{\text{четн}} = \text{ch}B_1 \text{sh}(B_0 + B_2 + B_4). \quad (3)$$

Для определения нечетных гармоник согласно (2) имеем:

$$F_{\text{неч}} = \text{sh}B_1 \text{ch}(B_0 + B_2 + B_4). \quad (4)$$

Пользуясь (3) и (4), можно рассчитать основные характеристики многофункциональных трансформаторов, позволяющих увеличить выходную частоту в два и четыре раза.

II. Характеристики удвоителя частоты

Режим холостого хода.

Вторая гармоника магнитной индукции B_{2m} :

$$B_{2m} = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \text{arsh} \left(\frac{h_0}{\text{ch}(B_{1m} \cos k \omega t_k)} \right) \cos(2k \omega t_k),$$

где ω – выходная частота инвертора.

Постоянная составляющая магнитной индукции B_0 :

$$B_0 = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \text{arsh} \frac{h_0}{\text{ch}(B_{1m} \cos k \omega t_k)}.$$

Выходное напряжение при известной магнитной индукции равно:

$$U_{2m} = 4\omega B_{2m} Q w_2,$$

где Q – сечение стержня трансформатора удвоителя; w_2 – число витков выходной обмотки.

Амплитуды первой гармоники напряженности магнитного поля [7]:

$$H_{1m(1)} = 0,5 \text{sh}B_{1m} \text{ch}(B_0 - B_{2m}) + \text{ch}B_{0m}.$$

Режим нагрузки.

При расчете режима нагрузки полагаем, что в режиме короткого замыкания индукция B_2 равна нулю. Тогда напряженность H_{2m} в этом режиме определится из уравнения:

$$\sum_{k=0}^{k-1} \text{arsh} \frac{h_0 + H_{2m} \cos k 2\omega t_k}{\text{ch}(B_{1m} \cos k \omega t_k)} \cos 2k \omega t_k = 0. \quad (5)$$

Определив из (5) зависимость $H_{2m}=f(h_0)$ рассчитываем сопротивление короткого замыкания $x_2=E_{20}/I_2$, где E_{20} и I_2 действующие значения ЭДС вторичной обмотки при холостом ходе и ток той же обмотки при коротком замыкании. Эти величины определяются следующим образом:

$$E_{2m} \approx U_{2m} I_{2m} = H_{2m} l w_2.$$

Таким образом, (5) дает возможность построить внешние характеристики преобразователя при изменении нагрузки.

III. Характеристики умножителя частоты в четыре раза (учетверитель)

Данный многофункциональный преобразователь позволяет получить на выходе три различных частоты при одной выходной частоте инвертора. Наряду с частотой ω , равной выходной частоте полупроводникового преобразователя, возможны выходные частоты 2ω и 4ω . Как и в первом случае, рассмотрим сначала режим холостого хода.

Режим холостого хода.

В режиме холостого хода ток $I_2 = 0$, к зажимам обмотки w_c подключен конденсатор, поэтому по ней протекает ток $i_c = I_{cm} \cos 2\omega t_k$, по фазе совпадающий с потоком Φ_2 . Очевидно, также изменяется и напряженность h_2 . Значения B_{2m} , B_{4m} , B_0 определим из (2,3):

$$B_{2m} = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \operatorname{arsh} \frac{h_0 + h_{cm} \cos(2k\omega t_k)}{\operatorname{ch}(B_{1m} \cos k\omega t_k)} \cos(2k\omega t_k).$$

Ток выходной обмотки w_2 равен нулю, индукция изменяется по закону: $B_4 = B_{4m} \cos t$. Значения B_{4m} и постоянной составляющей индукции B_0 определяются из следующих соотношений:

$$B_{4m} = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \operatorname{arsh} \frac{h_0 + h_{cm} \cos(2k\omega t_k)}{\operatorname{ch}(B_{1m} \cos k\omega t_k)} \cos(4k\omega t_k);$$

$$B_0 = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \operatorname{arch} \frac{h_0 + h_{cm} \cos(4k\omega t_k)}{\operatorname{ch}(B_{1m} \cos k\omega t_k)}.$$

Можно принять, что при изменении нагрузки, то есть тока выходной обмотки, ток и напряжение обмотки самоподмагничивания не изменяются, поэтому режимы нагрузки данного многофункционального трансформатора рассчитываются также как для удвоителя.

Режим нагрузки.

Как и ранее, предполагаем, что в режиме короткого замыкания выходной обмотки, индукция B_{4m} равна нулю и напряженность в этом режиме определяем аналогично (5):

$$\sum_{k=0}^{k-1} \operatorname{arsh} \frac{h_0 + H_{cm} \cos(2k\omega t_k) + H_{4m} \cos(4k\omega t_k)}{\operatorname{ch}(B_{1m} \cos k\omega t_k)} = 0.$$

Следует отметить, что напряженности $h_0 = I_d w_d / l$, $H_{cm} = I_{cm} w_c / l$ задаются. Дальнейший расчет производится так же, как расчет нагрузочного режима ферромагнитного преобразователя частоты в два раза. Приведенные зависимости с учетом того, что расчет полупроводниковых преобразователей освещен во многих источниках [10], позволяют определить параметры преобразователя частоты при каскадном включении обоих типов преобразователей.

IV. Заключение

1. Совместная работа полупроводниковых преобразователей частоты и многофункциональных трансформаторов позволяет расширить частотный диапазон в заданное число раз, осуществить работу полупроводникового преобразователя с разными частотами, согласовать выходные параметры инвертора и нагрузки, усовершенствовать защиту с учетом параметров ферромагнитных устройств.

2. Входные параметры преобразователя можно рассчитать, применяя приближенный гармонический анализ по методу Бесселя

3. Применение многофункциональных трансформаторов не приводит к расширению элементной базы электротехнологической установки, так как трансформаторы и сейчас применяются во многих установках, включающих индукционный нагрев

© Рогинская Л.Э., 2021

© Горбунов А.С., 2021

© Меднов А.А., 2021

Поступила в редакцию 28.06.2021

Received 28.06.2021

Библиографический список

- [1] Лебедев А.В. Выбор источников питания для индукционного нагрева // Электроника и информационные технологии. 2009. № 6. С. 1-7. [Электронный ресурс]. URL: http://fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/Induction_heating_source.pdf (дата обращения: 14.04.2021)

- [2] Nikitin Yu.A. The systems induction distributed low temperature heating and their application in the oil and gas industry // 2020 International Conference on Electro-technical Complexes and Systems (ICOECS), Oct. 27–30, 2020, Ufa, Russia. Ufa, Russia: IEEE, 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278518.
- [3] Shchukin V.G., Popov V.N. Evaluation of surface metal layer modification processes under high-frequency induction heating // AIP conference proceedings. 2019. Т. 2125. № 1. 030068. DOI: 10.1063/1.5117450.
- [4] Antipin A., Frizen V., Bychkov S. Determination of parameters of high-frequency matching transformer of installation of induction heating // 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), June 6–8, 2019, Varna, Bulgaria. P. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771648.
- [5] Аитов И., Камалетдинова Р. Вопросы проектирования систем и элементов защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2011. Т. 1. № 29. С. 59-64.
- [6] Аитов И. Тиристорные источники питания повышенной мощности для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 17. С. 80-86.
- [7] Бамдас А.М., Блинов И.В., Захаров Н.В., Шапиро С.В. Ферромагнитные умножители частоты М.: Энергия, 1968. – 176 с. (Серия «Трансформаторы», вып. 18).
- [8] Рогинская Л.Э., Латыпов А.Р., Меднов А.А. Выбор параметров многофункционального трансформатора // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 61-68. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-61-68.
- [9] Рогинская Л.Э., Латыпов А.Р. Расширение частотного диапазона полупроводникового преобразователя на базе многофункциональных трансформаторов (умножители частоты) // Практическая силовая электроника. 2015. № 2 (58). С. 41-45.
- [10] Медведев В.А. Расчет автономных резонансных инверторов для индукционного нагрева. Тольятти: ТГУ, 2010 – 47 с.

References

- [1] A.V. Lebedev, “Vybor istochnikov pitaniya dlya indukcionnogo nagreva [The choice of power sources for induction heating]”, *Elektronika i informacionnye tekhnologii [Electronics and information technology]*, no. 6, pp. 1-7, 2009. [Online]. Available at: http://fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/Induction_heating_source.pdf [Accessed: Apr. 14, 2021] (in Russian).
- [2] Yu.A. Nikitin, “The systems induction distributed low temperature heating and their application in the oil and gas industry”, in proc. *2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Oct. 27–30, 2020, Ufa, Russia, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278518.
- [3] V.G. Shchukin and V.N. Popov, “Evaluation of surface metal layer modification processes under high-frequency induction heating”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2125, is. 1, 030068. DOI: 10.1063/1.5117450.
- [4] A. Antipin, V. Frizen and S. Bychkov, “Determination of parameters of high-frequency matching transformer of installation of induction heating”, in proc. *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, June 6–8, 2019, Varna, Bulgaria, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771648.

- [5] I. Aitov and R. Kamaletdinova, “Voprosy proektirovaniya sistem i elementov zashchity tiristornyh preobrazo-vatelej chastoty dlya elektrotekhnologicheskikh ustanovok [Questions of designing systems and protection elements for thyristor frequency converters for electrotechnological installations]”, *Silovaya Elektronika [Power electronics]*, vol. 1, no. 29, pp. 59-64, 2011 (in Russian)
- [6] I. Aitov, “Tiristornye istochniki pitaniya povyshennoj moshchnosti dlya elektrotekhnologicheskikh ustanovok [Thyristor high-power power sources for electrotechnological installations]”, *Silovaya Elektronika [Power electronics]*, no. 17, pp. 80-86, 2008 (in Russian)
- [7] A.M. Bandas, V.I. Blinov, N.I. Zakharov and S.V. Shapiro, *Ferromagnitnye umnozhiteli chastoty [Ferromagnetic frequency converters]*. Moscow, Energiya, 1968 (in Russian).
- [8] L.E. Roginskaya, A.R. Latypov and A.A. Mednov, “The selecting of multifunctional transformer parameters”, *Vestnik MEI. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*, no. 1, pp. 61-68, 2019. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-61-68.
- [9] L.E. Roginskaya and A.R. Latypov, “Frequency range enhancement of semiconductor converter based on multifunctional transformers (frequency multipliers)”, *Practical Power Electronics*, no. 2 (58), pp. 41-45, 2015.
- [10] V.A. Medvedev, *Raschet avtonomnyh rezonansnyh invertorov dlya indukcionnogo nagreva [Calculation of autonomous resonant inverters for induction heating]*. Tolyatti: TSU, 2010. (in Russian),

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рогинская Любовь Эммануиловна, доктор технических наук, профессор Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация.

Lyubov E. Roginskaya, D. Sci. (Eng.), professor of the Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation.

Горбунов Антон Сергеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация.

Anton S. Gorbunov, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor of the Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation.

Меднов Антон Александрович, младший научный сотрудник Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация.

Anton A. Mednov, junior researcher of the Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation.