

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

---

УДК 621.314.25

DOI 10.46960/2658-6754\_2020\_2\_82

**Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов**

### **УСТАНОВЛЕННАЯ МОЩНОСТЬ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ФАЗОПРЕОБРАЗУЮЩИХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассмотрены автотрансформаторные и трансформаторные преобразователи числа фаз для питания многопульсных многомостовых выпрямителей. Охарактеризованы основные проблемы, возникающие при работе силовых трансформаторов и автотрансформаторов на нелинейную выпрямительную нагрузку и принципиальные схемы таких устройств. Приведены результаты расчета величины установленной мощности при питании 18-пульсного трехмостового выпрямителя от фазообразующего трансформатора со вторичными обмотками, соединенными по схемам «звезда» и два «зигзага». Показан расчет установленной мощности при питании 24-пульсного выпрямителя на базе четырех мостов от трансформатора с вторичными обмотками, соединенными по схемам «звезда», «треугольник» и два «зигзага». Рассмотрены устройства с преобразованием числа и сдвига фаз на вторичной и первичной сторонах. Показана принципиальная схема трансформаторного преобразователя для питания 24-пульсного выпрямителя с преобразованием числа и сдвига фаз на первичной и вторичной стороне. Приведена расчетная осциллограмма суммарного первичного тока такого преобразователя, которая практически не отличается от аналогичной кривой первичного тока ранее рассмотренного трансформаторного преобразователя с преобразованием на вторичной стороне.

**Ключевые слова:** автотрансформатор, выпрямитель, обмотки, трансформатор, установленная мощность.

#### **I. Введение**

В настоящее время в связи с расширением применения постоянного тока в различных промышленных устройствах малой и высокой мощности, при низких и высоких уровнях напряжений, актуальной стала задача совершенствования соответствующих источников питания для получения

постоянного (или выпрямленного пульсирующего) тока. Одним из наиболее используемых направлений такого усовершенствования является разработка и применение многофазных (фазообразующих) трансформаторов и автотрансформаторов с повышением пульсности схем выпрямителей. Многопульсные выпрямители могут быть образованы путем использования  $n$  трехфазных выпрямительных мостов, соединенных по выходу последовательно или параллельно (при этом получается  $6 \cdot n$ -пульсный выпрямитель). Недостатки мостовых выпрямителей, в частности – более высокие потери в вентилях, по сравнению с некоторыми другими трехфазными схемами, приводят к тому, что в настоящее время предлагается использовать многопульсных кольцевых выпрямителей. В таких выпрямителях снижено количество вентиляей, обтекаемых током нагрузки, по сравнению с трехфазными многомостовыми вариантами [1].

## **II. Схемы применяемых преобразователей числа фаз и величины их установленных мощностей**

Рассмотренные выше многопульсные выпрямители питаются от источника питания с повышенным числом фаз, для чего используются фазообразующие выпрямительные трансформаторы и автотрансформаторы. Известно, что работа трансформаторов или автотрансформаторов для питания полупроводниковых преобразователей – выпрямителей, характеризующихся нелинейными свойствами полупроводниковых вентиляей, приводит к несинусоидальному характеру токов в обмотках преобразователя, превышению установленной мощности такого устройства по сравнению с мощностью нагрузки на стороне постоянного тока. В связи с этим, в настоящее время целесообразно применять схемы трансформаторных (или автотрансформаторных) преобразователей. В них, по сравнению с обычным трехфазным трехстержневым выпрямительным трансформатором, конфигурация обмоток и фазовый сдвиг между вторичными системами напряжений соответствуют минимально возможному превышению установленной мощности.

На рис. 1 приведена схема 18-пульсного выпрямителя, питаемого от автотрансформаторного преобразователя числа фаз. В литературе для применения в летательных аппаратах в составе источников питания постоянного тока предлагается несколько вариантов топологий построения обмоток для данного выпрямителя [2].

Применение автотрансформатора с использованием для питания выпрямителей обмоток, соединенных непосредственно с сетью (источником питания), обуславливает жесткую зависимость вторичного напряжения от первичного. Тем самым ограничиваются возможности широкого регулирования вторичного напряжения данного преобразователя. Извест-

но, что автотрансформаторы выгодно использовать при небольших значениях коэффициентов трансформации. Чтобы обеспечить возможность широкого регулирования вторичного напряжения, можно использовать дополнительные питающие трансформаторы или другие варианты регулируемых источников электропитания.

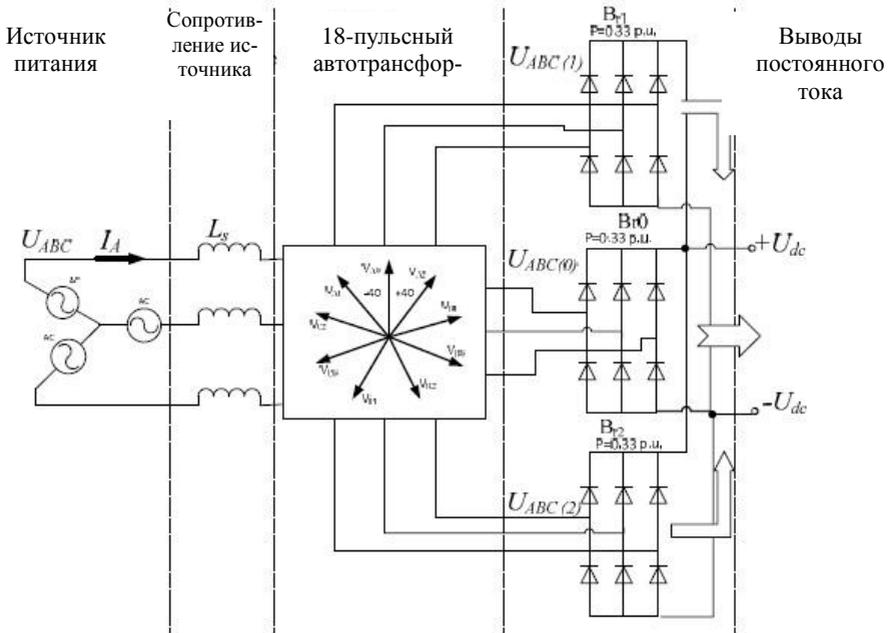


Рис. 1. Схема источника питания с автотрансформаторным преобразователем

По результатам расчетов, представленных в исследованиях, величины установленной мощности таких преобразователей числа фаз существенно меньше по сравнению с трансформаторными преобразователями. Это обуславливает эффективность применения таких устройств в составе летательных аппаратов, где вопрос достижения минимальных массогабаритных показателей является одним из важнейших, если перечисленные недостатки являются допустимыми при применении в конкретной технической системе.

Использование трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ) позволяет обеспечить гальваническую развязку первичной сети от вторичных цепей, трансформаторы могут быть выполнены в широком диапазоне коэффициентов трансформации.

Рассмотрим особенности расчета установленной мощности некоторых вариантов трансформаторных преобразователей для питания многопульсных выпрямителей. В таких преобразователях повышение установленной мощности происходит, в том числе, вследствие использования вторичных обмоток, образованных катушками, расположенными на разных стержнях магнитопровода. В результате геометрическая сумма магнитодвижущих сил (МДС) и чисел витков обмоток оказывается меньше соответствующей арифметической суммы.

В [3] показано, что с повышением числа вторичных фаз рассматриваемых ТПЧФ отношение чисел витков вторичной фазы к числу витков  $w_{21}$  «базовой» вторичной обмотки, соединенной в звезду, составляет:

$$\frac{w_{2k}}{w_{21}} = \frac{6}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right)}{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{3}\right)} \cdot d\alpha = \frac{6 \cdot 0,5}{\pi \cdot 0,866} = 1,1, \quad (1)$$

где  $w_{2k}$  – число витков вторичной фазы ТПЧФ,  $\alpha$  – угол между векторами вторичных напряжений фазы ТПЧФ.

При этом в частных случаях для различных схем ТПЧФ и различного числа вторичных фаз данное соотношение несколько изменяется в зависимости от количества используемых «базовых» вторичных обмоток, соединенных в звезду или треугольник.

На рис. 2 приведена принципиальная схема ТПЧФ 3/9, питающего 18-пульсный трехмостовой выпрямитель [4-6].

В данном преобразователе установленная мощность вторичной обмотки с числом витков  $w_{21}$ , соединенной в звезду, составляет [7]:

$$S_{21} = 3 \cdot U_2 \cdot I_{21} = \frac{3 \cdot U_d \cdot 0,816 \cdot I_d}{2,34} = 1,046 \cdot U_d \cdot I_d = \frac{1,046 \cdot U_{d1} \cdot I_d}{3} = 0,35 \cdot U_{d1} \cdot I_d, \quad (2)$$

где  $U_2$  – фазное напряжение, В;  $I_{21}$  – фазный ток, А;  $I_d$  – ток нагрузки, А;  $U_d$  – выпрямленное напряжение одного моста, В.

Суммарная установленная мощность ТПЧФ составляет:

$$\begin{aligned} S_{\text{уст}} &= 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n S_n = 0,5 \cdot (S_1 + S_{21} + S_{22} + S_{23}) = \\ &= 0,5 \cdot U_{d1} \cdot I_d \cdot (1,004 + 0,35 + 0,4 + 0,4) = 1,077 \cdot U_{d1} \cdot I_d, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S_1$  – установленная мощность первичной обмотки, о.е.;  $S_{2n}$  – установленные мощности вторичных обмоток, о.е.

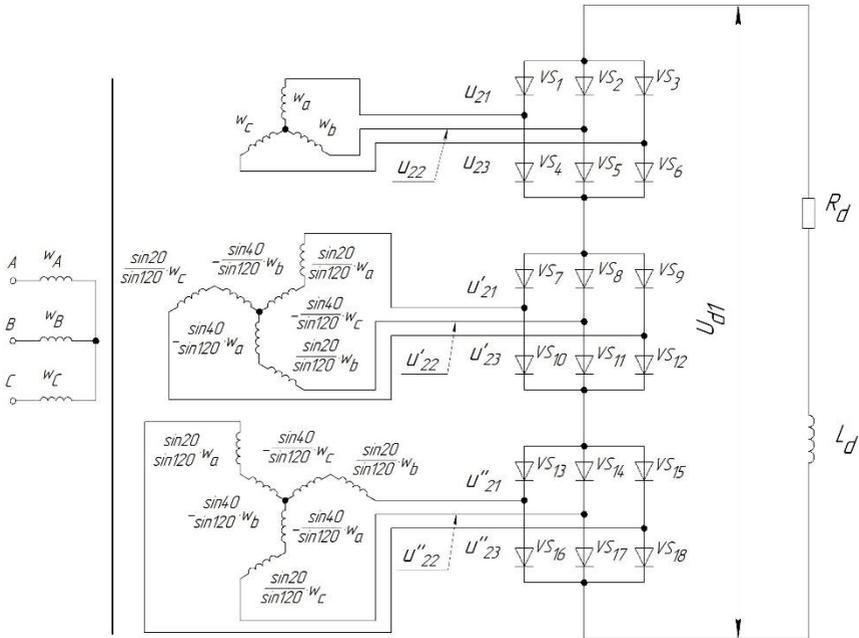


Рис. 2. ТПЧФ с 18-пульсным выпрямителем

На рис. 3 приведена принципиальная схема ТПЧФ 3/12 с 24-пульсным выпрямителем. ТПЧФ образован четырьмя вторичными обмотками, соединенными в звезду, треугольник и 2 зигзага [8, 9].

Установленная мощность обмоток, соединенных в зигзаги, составляет [3]:

$$S_2'' = S_2''' = 1,115 \cdot \frac{\pi \cdot U_{d1} \cdot I_d}{12}. \quad (4)$$

Суммарная установленная мощность ТПЧФ:

$$S_{\text{Уст}}^* = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n S_n = \frac{\frac{\pi}{3} \cdot (0,998 + 1,058) \cdot U_{d1} \cdot I_d}{2} = 1,076 \cdot U_{d1} \cdot I_d, \quad (5)$$

где  $S_n$  – установленные мощности первичной и вторичной сторон ТПЧФ, о.е.

Рассмотрим другой вариант построения ТПЧФ 3/12. Как известно, преобразование числа и сдвига фаз в трансформаторах может выполняться помимо вторичной стороны, также и на первичной стороне. Для этой цели первичные обмотки ТПЧФ могут выполняться по схемам зигзагов или могут использоваться несколько трансформаторов с первичными обмотками,

соединенными по схемам звезды, треугольника, зигзагов и т.д. На рис. 4 показан пример реализации ТПЧФ 3/12 на базе четырех силовых трансформаторов с первичными обмотками, соединенными по схемам двух зигзагов и двух звезд [10]. Именно таким образом достигается преобразованное число и сдвига фаз на первичной и вторичной стороне ТПЧФ.

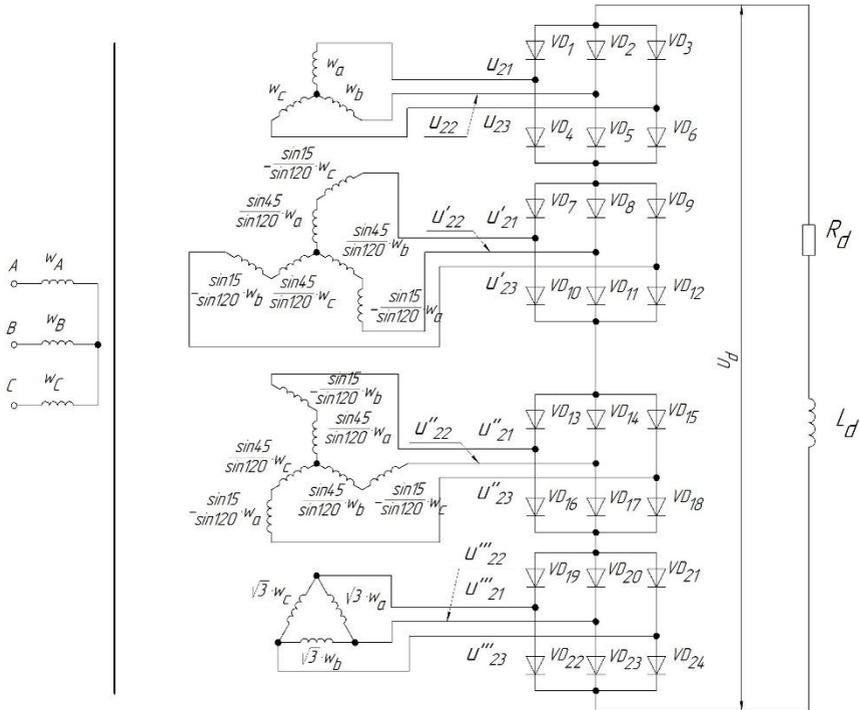


Рис. 3. ТПЧФ с 24-пульсным выпрямителем

На рис. 5 приведен расчетный график суммарной первичной МДС (или расчетного суммарного первичного тока, имеющего аналогичный вид).

Качество кривой суммарного потребляемого тока практически не отличается от случая однотрансформаторного преобразователя по рис. 3, при этом за счет параллельной работы трансформаторов возможно повышение надежности электроснабжения потребителей. Величина установленной мощности такого устройства незначительно отличается от случая одного трансформатора.

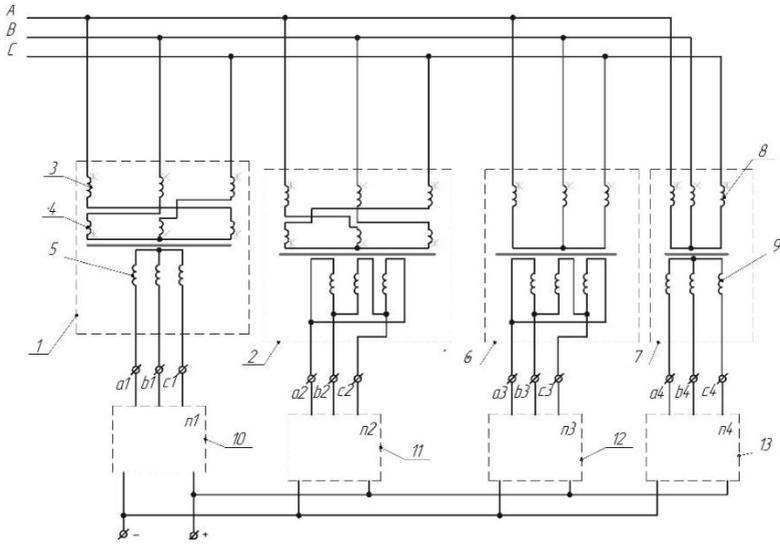


Рис. 4. ТПЧФ 3/12 с преобразованием числа и сдвига фаз на первичной и вторичной сторонах

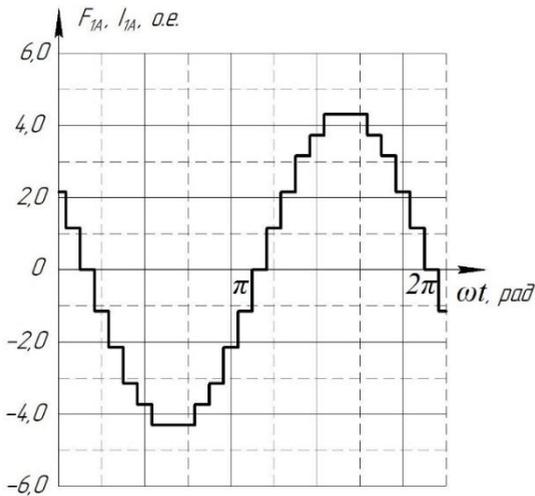


Рис. 5. Суммарная первичная МДС (суммарный первичный ток) ТПЧФ 3/12 с преобразованием числа и сдвига фаз на первичной и вторичной сторонах

### III. Заключение

В настоящее время имеются разнообразные схемные решения автотрансформаторных и трансформаторных преобразователей числа фаз с различным количеством вторичных фаз. Установленные мощности ТПЧФ при их работе на 18- и 24-пульсные выпрямители незначительно отличаются от обычной величины установленной мощности трехфазного выпрямительного трансформатора. В относительных единицах она составляет  $S_{уст}^* = 1,045 \cdot U_d \cdot I_d$ , превышая ее на 1-5 %. У обычного трехстержневого трансформатора, питающего линейную нагрузку, данное превышение составит 5-10 %. Автотрансформаторные преобразователи числа фаз обладают при этом меньшими показателями установленной мощности.

В ряде случаев целесообразно применение питания многопульсных выпрямителей от ТПЧФ, образованных несколькими трансформаторами. При этом осциллограмма суммарного потребляемого тока практически не меняется, а надежность электроснабжения потребителей повышается за счет параллельной работы нескольких трансформаторов. Возможно также использование устройств, позволяющих производить преобразование числа и сдвига фаз как на вторичной, так и на первичной сторонах.

© Рогинская Л.Э., 2020

© Горбунов А.С., 2020

### Библиографический список

- [1] Евдокимов С.А., Щуров Н.И. Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 423 с.
- [2] Khan S., Zhang X., Saad M., Ali H., Khan B.M., Zaman H. Comparative analysis of 18-pulse autotransformer rectifier unit topologies with intrinsic harmonic current cancellation // *Energies*. 2018. Vol. 11 (6). Pp. 1-18.
- [3] Roginskaya L., Gorbunov A. Installed power of transformers for equivalent multiphase rectification circuits // in proc. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Oct. 21-25, 2019, Ufa, Russia. 2020. P. 1-7.
- [4] Ялалова З.И., Рогинская Л.Э., Рахманова Ю.В. Определение электромагнитной совместимости фазообразующих трансформаторов преобразовательных установок // *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2013. № 2. С. 16-19.
- [5] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Ялалова З.И. Электромагнитные процессы в многофазном выпрямительном трансформаторе // *Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение: Межвузовский научный сборник*. Уфа: УГАТУ, 2013. С. 266-270.
- [6] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Фазообразующий трансформатор как элемент системы повышения электромагнитной совместимости управляемого полупроводникового преобразователя с сетью и нагрузкой // *Практическая силовая электроника*. 2016. № 3 (63). С. 28-34.

- [7] Roginskaya L.E., Gorbunov A.S. Determination of installed power of autotransformer phase number converters to improve electromagnetic compatibility // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 15-18, 2018, Moscow, Russia. 2019. P. 1-6.
- [8] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Уменьшение влияния на окружающую среду электромагнитных помех, создаваемых управляемыми полупроводниковыми преобразователями, при помощи фазопреобразующих трансформаторов // Экологические системы и приборы. 2017. № 11. С. 50-61.
- [9] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Ялалова З.И. Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. № 3. Т. 10. С. 21-30.
- [10] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Меднов А.А. Многопульсное выпрямительное устройство, Пат. 184790 РФ, заявл. 13.06.18; опубл. 09.11.18. – Бюл. №31.

**L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov**

## **INSTALLED POWER OF AUTOTRANSFORMERS AND TRANSFORMERS RECTIFIER PHASE CONVERTER**

Ufa State Aviation Technical University  
Ufa, Russia

**Abstract.** The article deals with the use of autotransformer and transformer converters of the number of phases for powering multipulse multi-bridge rectifiers. The main problems that arise during the operation of power transformers and autotransformers for non-linear rectifier loading are given. The schematic diagrams of such devices are shown. So, the circuit of an 18-pulse autotransformer converter with a minimum installed power and intended for use in aviation is shown. The results of calculating the amount of installed power when supplying an 18-pulse three-bridge rectifier from a phase-converting transformer with secondary windings connected by star and two zigzag circuits are presented. The calculation of the installed power is shown when supplying a 24-pulse rectifier based on four bridges from a transformer with secondary windings connected according to the «star», «triangle» and two «zigzag» circuits. Devices with conversion of the number of phases and phase shift on the secondary and primary sides are considered. A schematic diagram of a transformer converter for supplying a 24-pulse rectifier with conversion of the number of phases and phase shift on the primary and secondary side is shown. The calculated waveform of the total primary current of such a converter is presented, which practically does not differ from the similar curve of the primary current of the previously considered transformer converter with conversion of the number of phases and phase shift on the secondary side.

**Keywords:** autotransformer, rectifier, windings, transformer, installed power.

## References

- [1] S.A. Evdokimov and N.I. Schurov, *Strukturnyy sintez mnogofaznykh ventil'nykh preobrazovateley [Structural synthesis of multiphase semiconductor converters]*. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2010, 423 p (in Russian).
- [2] S. Khan, X. Zhang, M. Saad, H. Ali, B.M. Khan and H. Zaman, «Comparative analysis of 18-pulse autotransformer rectifier unit topologies with intrinsic harmonic current cancellation», *Energies*, vol. 11, pp. 1-18, 2018.
- [3] L. Roginskaya and A. Gorbunov, «Installed Power of Transformers for Equivalent Multiphase Rectification Circuits», in proc. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Oct. 21-25, 2019, Ufa, Russia, pp. 1-7.
- [4] Z.I. Yalalova, L.E. Roginskaya and Yu.V. Rakhmanova, «Determination of electromagnetic compatibility of phase converting transformers of converting units», *ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*, no. 2, pp. 16-19, 2013 (in Russian).
- [5] L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov and Z.I. Yalalova, «Elektromagnitnyye protsessy v mnogofaznom vypryamitel'nom transformatore [Electromagnetic processes in a multiphase rectifier transformer]», in proc. *Interuniversity Scientific Collection: Elektroenergeticheskiye sistemy i seti. Energoberezheniye [Electroenergetic systems and networks. Energy saving]*, 2013, Ufa, Russia, pp. 266-270 (in Russian).
- [6] L.E. Roginskaya and A.S. Gorbunov, «Phase-converting transformer as an element of controlled semiconductor converter electromagnetic compatibility increase with mains and load», *Practical Power Electronics*, no. 3 (63), pp. 28-34, 2016.
- [7] L.E. Roginskaya and A.S. Gorbunov, «Determination of installed power of autotransformer phase number converters to improve electromagnetic compatibility», in proc. *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 15-18, 2018, Moscow, Russia, pp. 1-6.
- [8] L.E. Roginskaya and A.S. Gorbunov, «Reducing the influence on the environment of the electromagnetic interferences created by controlled semiconductor converters, using phase-converting transformers», *Ecological Systems and Devices*, no. 11, pp. 50-61, 2017 (in Russian).
- [9] L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov and Z.I. Yalalova, «Improving of electromagnetic compatibility of converter devices with mains and load using multiphase transformers», *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, no. 3, vol. 10, pp. 21-30, 2014.
- [10] L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov and A.A. Mednov, «Mnogopol'snoye vypryamitel'noye ustroystvo [Multipulse rectifier device]», R.F. Patent 184790, Nov. 09, 2018 (in Russian).