

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК 621.314.6

Л.Э. Рогинская, Д.В. Гусаков, Д.Р. Масалимов

### ИССЛЕДОВАНИЕ 18-ПУЛЬСНЫХ АВТО- И ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

В рамках повышения конкурентоспособности отечественных летательных аппаратов актуальной является концепция перехода к самолетам с полностью электрифицированным оборудованием. В статье представлены результаты исследований 18-пульсных авто- и трансформаторно-выпрямительных устройств, применяющихся для получения постоянного тока на борту летательных аппаратов. Приведены результаты компьютерного моделирования 18-пульсного трансформаторно-выпрямительного устройства. Особенностью трансформатора является использование аморфного сплава для снижения удельных потерь холостого хода. Представлены результаты исследования 18-пульсного автотрансформаторно-выпрямительного устройства с конфигурацией вторичных обмоток, обеспечивающей высокое качество выходного напряжения. Установлено, что моделирование методом конечных элементов позволяет определить выходные характеристики устройств с погрешностью до 7 %.

**Ключевые слова:** автотрансформаторно-выпрямительное устройство, аморфный сплав, компьютерное моделирование, летательный аппарат, трансформаторно-выпрямительное устройство.

#### 1. Введение

Одним из наиболее перспективных направлений создания конкурентоспособного отечественного самолета является переход к концепции самолета с полностью электрифицированным оборудованием (условное устоявшееся наименование – «полностью электрический самолет» или ПЭС). Данное понятие предполагает самолет с единой централизованной системой электроснабжения, обеспечивающей все энергетические потребности самолета.

Основное преимущество архитектуры «электрического» самолета – широкие возможности управления энергией, поскольку работа электрогенераторов регулируется в точном соответствии с потребностями систем, а потери минимизируются. Так, по сравнению с традиционной схемой, экономия топлива может достигать 4 %, а снижение эксплуатационных расходов – 18 %. Однако такой переход к системе ПЭС увеличивает нагрузку на электрооборудование летательного аппарата, а также повышает ответственность работы всей системы электроснабжения и каждого ее элемента в отдельности. В ПЭС многие функции, которые обычно управляются гидравлическим, пневматическим и механическим приводом, заменяются устройствами, приводимыми в действие электрическим током [1, 2]. Такая замена уменьшает вес и объем системы, повышает общую надежность, возможности и ремонтпригодность, а также обеспечивает более длительный срок эксплуатации самолета. Для реализации преимуществ, предлагаемых концепцией ПЭС, необходимо решить несколько вопросов, таких как взаимодействие между источником питания и нагрузкой, нестабильности и генерации гармоник тока низкого порядка на стороне питания переменного тока.

Для преобразования переменного тока в постоянный ток используются многофазные трансформаторные выпрямители как основной источник питания благодаря своей простой структуре и высокой надежности. Гражданские самолеты используют трансформаторно-выпрямительное устройство (ТВУ) для преобразования 115 В частотой 400 Гц переменного тока в 27 В постоянного тока. Однако в последнее время автотрансформаторный выпрямитель привлекает больше внимания в аэрокосмической промышленности из-за его пониженного значения кВА по сравнению с ТВУ [3].

Особого внимания при разработке новых методов управления и эффективных преобразователей энергии требует высокая надежность и производительность для соответствия стандартам качества электроэнергии [4]. Для низкого пульсирующего выходного напряжения и меньшего общего гармонического искажения (ТНД) при входном токе питания, лучшими оказались многопульсные преобразователи переменного тока в постоянный ток. Поддерживая низкое ТНД на стороне переменного тока, эти преобразователи потребляют сравнительно мало энергии. Однако преобразователи мощности создают помехи существующей энергосистеме посредством электромагнитных помех, когда используются методы фильтрации активных гармоник. В случае методов фильтрации пассивных гармоник они создают помехи из-за возможного резонанса с емкостными фильтрами. К счастью, многопульсные преобразователи не используют высокочастотное переключение или емкостную фильтрацию, что могло бы вызвать

названные проблемы. В многопульсных преобразователях идея фильтрации основывается на собственном подавлении гармоник тока, а не на методе подавления магнитного потока, и приводит к снижению общих гармоник [5]. При питании выпрямителей от промышленной сети общего пользования число первичных фаз трансформатора выпрямителя задано: одна или три. Вместе с тем, число вторичных фаз трансформатора может быть больше числа первичных фаз. При необходимости число фаз вторичных напряжений трехфазного трансформатора может быть любым, в том числе и не кратным трем, что достигается при комбинации напряжений вторичных обмоток трансформатора, подобных соединению в зигзаг [6-7].

Идея многопульсного выпрямителя была разработана путем подключения двух или более основных 6-пульсных выпрямителей (в зависимости от количества фаз, генерируемых трансформатором) для получения многопульсной системы выпрямления [8]. Улучшение характеристик достигается за счет увеличения числа фаз, генерируемых автотрансформаторами, поскольку гармоники входного тока, вводимые в многопульсных преобразователях, имеют порядки  $6m \pm 1$  с амплитудами  $1 / (6m \pm 1)$ , где  $m$  – число фаз [9]. Это означает, что 18-пульсные ТВУ будут иметь свои гармоники тока, то есть 17-е и 19-е, с гораздо меньшими амплитудами и будут давать очень небольшие искажения по сравнению с 6-пульсными и 12-пульсными преобразователями на входном источнике питания.

Сравнение 6-, 12- и 18-пульсных выпрямителей в [10] показывает, что 6-пульсные и 12-пульсные методы недостаточны для удовлетворения меньших гармонических искажений. Для достижения лучших гармонических характеристик необходимо применять 18-пульсную или более мощную систему преобразования. Конструкция еще более многофазных преобразователей имеют значительные габаритные размеры и более сложную конструкцию обмоток, поэтому 18-пульсные трансформаторы считаются оптимальным решением.

## **II. Автотрансформаторно-выпрямительное устройство**

Для авиационных систем основополагающими критериями являются массогабаритные показатели изделий. Как было указано выше, для уменьшения габаритной мощности целесообразно использовать автотрансформаторно-выпрямительные устройства (АТВУ). В таких устройствах первичная и вторичная обмотки соединены напрямую. За счет этого они имеют не только магнитную, но и электрическую связь. Обмотка автотрансформатора имеет несколько выводов (как минимум 3), подключаясь к которым, можно получать разные электрические напряжения.

Один из вариантов 18-пульсного АТВУ представлен на рис. 1. В состав входит автотрансформатор (АТВ) и три параллельно соединенных трехфазных выпрямительных блока (ВБ1, ВБ2, ВБ3), состоящих из 18

диодов, образующих трехканальную систему. Конфигурация катушек фазосдвигающего автотрансформатора показана на рис. 1, б. В данном решении первичная обмотка соединена по схеме «треугольник», а для формирования 9-фазной системы напряжений используется симметричный способ, обеспечивающий последовательный фазовый сдвиг между девятью напряжениями на угол  $2\pi/9$ . Топология АТВУ-18 по рис. 2 обеспечивает независимую друг от друга работу выпрямительных мостов так, что интервал проводимости каждого диода моста равен  $2\pi/3$  (вместо  $2\pi/9$ ).

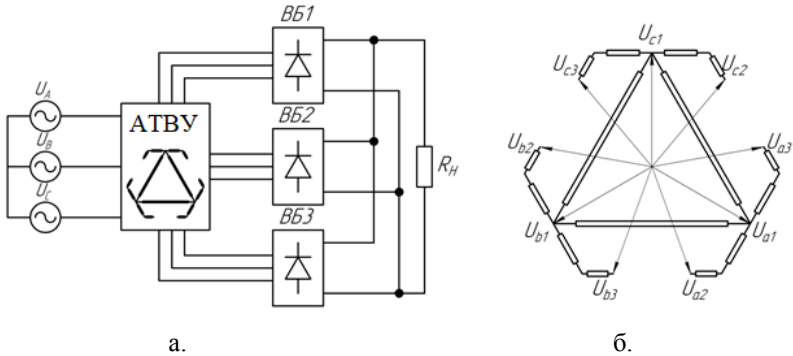


Рис. 1. Структурная схема 18-пульсного АТВУ (а) и конфигурация катушек (б)

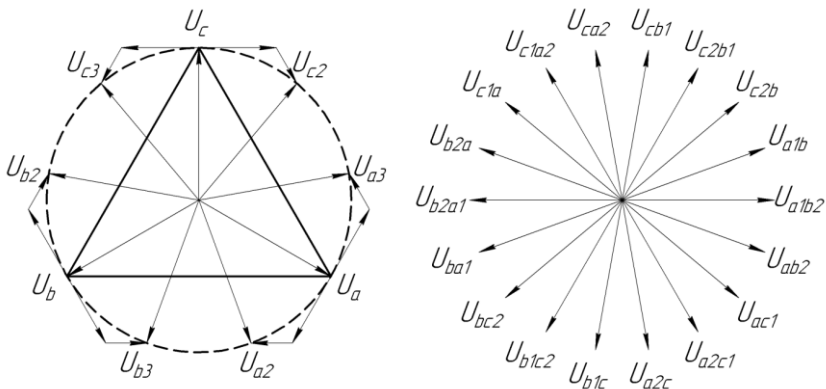


Рис. 2. Векторная диаграмма, поясняющая принцип формирования симметричной 9-фазной системы напряжений при выполнении АТВУ-18

Автотрансформатор имеет свою первичную обмотку со схемой соединения «треугольник», соединенную с источником питания  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$ .

Вторичные обмотки используются для генерации требуемых трех наборов напряжения  $(U_{a1}, U_{b1}, U_{c1})$ ,  $(U_{a2}, U_{b2}, U_{c2})$  и  $(U_{a3}, U_{b3}, U_{c3})$ . На вторичной стороне фазовый сдвиг между соседними напряжениями равен 40 эл. градусам.

В симметричной конфигурации автотрансформатор преобразует сбалансированный трехфазный источник переменного тока на девять фаз. При этом каждая фаза питания смещена от соседней на  $\pm 40^\circ$ . В данном случае ток каждого диода сдвинут от тока диода соседней фазы на  $40^\circ$ , в то время как ток каждой пары диодов сдвинут от соседней на  $20^\circ$ .

Диаграмма на рис. 5 показывает текущую последовательность проводимости диодных мостовых выпрямителей. Векторы напряжения на вторичной стороне могут быть получены путем соответствующего суммирования основных векторов с добавочными ( $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ , отмеченными на рис. 2). Из векторных диаграмм на рис. 5 можно вывести, что трехфазные напряжения вторичных обмоток могут быть заданы как функция трехфазных напряжений на первичной стороне. Один набор трехфазных напряжений на вторичной стороне трансформатора может быть задан в общем виде [11]:

$$\begin{cases} U_{a2} = U_A + \frac{k_1}{\sqrt{3}} \cdot (U_B - U_C) + \frac{k_2}{\sqrt{3}} \cdot (U_B - U_A) \\ U_{b2} = U_B + \frac{k_1}{\sqrt{3}} \cdot (U_C - U_A) + \frac{k_2}{\sqrt{3}} \cdot (U_C - U_B), \\ U_{c2} = U_C + \frac{k_1}{\sqrt{3}} \cdot (U_A - U_B) + \frac{k_2}{\sqrt{3}} \cdot (U_A - U_C) \end{cases}$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – отношения витков между первичной и вторичной обмотками трансформатора. Для конфигурации коэффициенты поворота заданы как  $k_1 = 0,51$  и  $k_2 = 0,27$ .

### III. Компьютерное моделирование

Для определения электромагнитных характеристик 18-пульсного ТВУ была разработана его компьютерная модель в среде Ansys Maxwell (рис. 3). Предварительно были проведены численные расчеты для определения габаритных показателей и расчета количества витков. Мощность рассчитанного ТВУ составляет 10,5 кВА, магнитная индукция насыщения 1,5 Тл (магнитопровод выполнен из аморфного сплава 1 СР), частота питающего тока 400 Гц, напряжение питания 115 В, выходное напряжение 27 В.

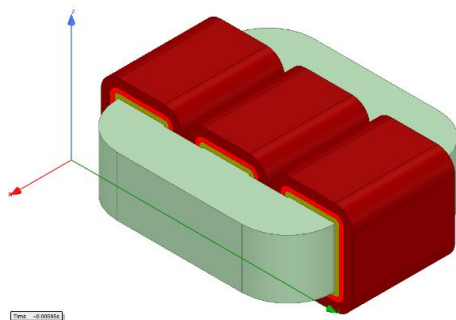


Рис. 3. 3D модель трансформатора ТВУ

Компьютерное моделирование проводилось при работе на активную нагрузку. Результаты моделирования представлены на рис. 4-5.

На рис. 4 показано распределение магнитной индукции по магнитопроводу ТВУ. На рис. 5 показаны осциллограмма напряжения на первичной (рис. 5, а) и вторичной обмотках (рис. 5, б).

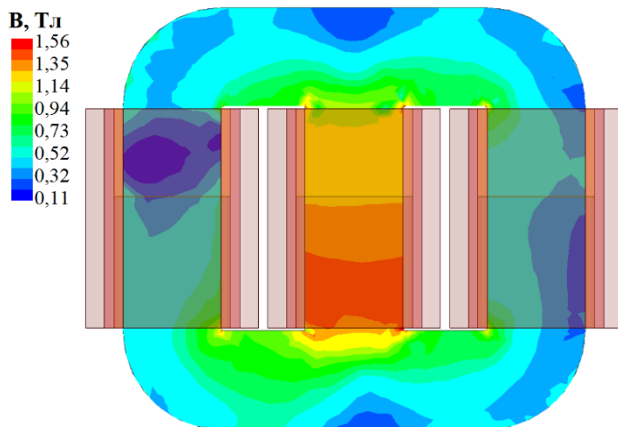


Рис. 4. Распределение магнитной индукции 18-пульсного ТВУ при работе под нагрузкой в момент времени

#### IV. Выводы

Использование авто- и трансформаторно-выпрямительных устройств уместно в различных классах напряжения и для различных целей применения. В целом в авиационной промышленности имеется тенденция

к переходу к автотрансформаторно-выпрямительным устройствам, благодаря уменьшению их габаритной мощности по сравнению с ТВУ. Недостаток таких устройств – наличие гальванической связи, что негативно скажется на надежности их работы.

Существующие методы преобразования тока и напряжения для получения заданных электромагнитных характеристик требуют повышения качества проектирования таких устройств путем применения современных методов моделирования, например, моделирования методом конечных элементов. С его помощью можно определить выходные характеристики устройств с погрешностью до 7%, а также уточнить результаты численных расчетов.

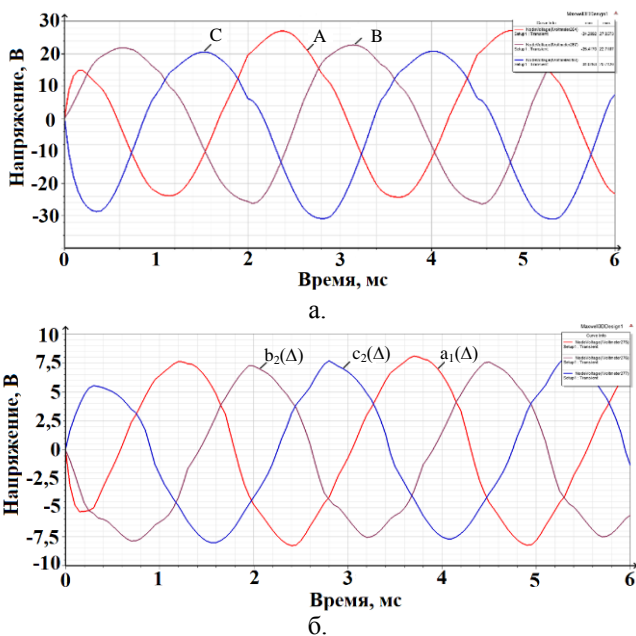


Рис. 5. Осциллограммы напряжений 18-пульсного ТВУ при работе на активную нагрузку: на первичной обмотке (а); на вторичной обмотке (б)

*Работа выполнена при поддержке гранта Республики Башкортостан молодым ученым.*

© Рогинская Л.Э., 2019

© Гусаков Д.В., 2019

© Масалимов Д.Р., 2019

**Библиографический список**

- [1] Quigley R.E.J. More electric aircraft // Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1993. Pp. 906-911.
- [2] Sarlioglu B., Morris C.T. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft // IEEE Trans. on Transportation Electrification. 2015. № 1. Pp. 54-64.
- [3] Choi S., Enjeti P.N., Pitel I.J. Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface // IEEE Trans. on Power Electronics. 1966. № 11. Pp. 680-690.
- [4] Khan S., Zhang X., Khan B.M., Ali H., Zaman H., Saad M. AC and DC Impedance Extraction for 3-Phase and 9-Phase Diode Rectifiers Utilizing Improved Average Mathematical Models // Energies. 2018. № 11 (3).
- [5] Swamy M., Kume T.J., Takada N. A Hybrid 18-Pulse Rectification Scheme for Diode Front-End Rectifiers with Large DC-Bus Capacitor // IEEE Trans. Ind. Appl. 2010. № 46 (6). Pp. 2484-2494.
- [6] Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Уч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.1. – 199 с.
- [7] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Фазопреобразующий трансформатор как элемент системы повышения электромагнитной совместимости управляемого полупроводникового преобразователя с сетью и нагрузкой // Практическая силовая электроника. 2016. № 63. С. 28-35.
- [8] Burgos R., Uan-Zo-li A., Lacaux F., Wang F., Boroyevich D. Analysis and Experimental Evaluation of Symmetric and Asymmetric 18-Pulse Autotransformer Rectifier Topologies // 2007-IEEE Power Conversion Conference (PCC'07). Nagoya, Japan. 2007. Pp. 1286-1293.
- [9] Meng F., Xu X., Gao L. A Simple Harmonic Reduction Method in Multipulse Rectifier Using Passive Devices // IEEE Trans. Ind. Inform. 2017. № 13. Pp. 2680-2692.
- [10] Khan S, Zhang X., Saad M., Ali H., Muhammad Khan B., Zaman H. Comparative Analysis of 18-Pulse Autotransformer Rectifier Unit Topologies with Intrinsic Harmonic Current Cancellation // Energies. 2018. № 11 (6). Pp. 1-18.
- [11] Yang T., Bozhko S., Wheeler P., Wang S., Wu S. Generic functional modelling of multi-pulse auto-transformer rectifier units for more-electric aircraft applications // Chinese Journal of Aeronautics. 2018. № 31 (5). Pp. 883-891.



L.E. Roginskaya, D.V. Gusakov, D.R. Masalimov

## RESEARCH OF 18-PULSE AUTO- AND TRANSFORMABLE DEVICES

Ufa State Aviation Technical University  
Ufa, Russia

**Abstract.** The implementation of the concept of aircraft with fully electrified equipment is relevant in the framework of improving the domestic aircraft competitiveness. This paper presents the results of studies of 18-pulse auto- and transformer-rectifier units used to obtain direct current on a board of aircraft. The results of computer simulation of an 18-pulse transformer-rectifier unit are given. A feature of the transformer is the use of amorphous alloy to reduce the specific no-load losses. The results of the study of 18-pulse autotransformer-rectifier unit with the configuration of secondary windings providing high-quality output voltage are presented. It is established that the simulation by the finite element method allows to determine the output characteristics of devices with an error of up to 7 %.

**Keywords:** autotransformer-rectifier unit, amorphous alloy, computer modeling, aircraft, transformer-rectifier unit.

### References

- [1] R.E.J. Quigley, «More electric aircraft», *Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 906-911, 1993.
- [2] B. Sarlioglu and C.T. Morris, «More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft» *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 1, pp. 54-64, 2015.
- [3] S. Choi, P.N. Enjeti and I.J. Pitel, «Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface», *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 11, pp. 680-690, 1966.
- [4] S. Khan, X. Zhang, B.M. Khan, H. Ali, H. Zaman and M. Saad, «AC and DC Impedance Extraction for 3-Phase and 9-Phase Diode Rectifiers Utilizing Improved Average Mathematical Models», *Energies*, vol. 11, no. 3, 2018.
- [5] M. Swamy, T.J. Kume and N. Takada, «A Hybrid 18-Pulse Rectification Scheme for Diode Front-End Rectifiers with Large DC-Bus Capacitor», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 6, pp. 2484-2494, 2010.
- [6] G.S. Zinoviev, *Osnovy silovoy elektroniki*. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 1999, Part 1, P. 199 (in Russian).
- [7] 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*, vol. 63, P. 28-35, 2016.
- [8] R. Burgos, A. Uan-Zo-li, F. Lacaux, F. Wang and D. Boroyevich, «Analysis and Experimental Evaluation of Symmetric and Asymmetric 18-Pulse Autotransformer

- Rectifier Topologies», *2007 IEEE Power Conversion Conference – Nagoya (PCC'07)*, pp. 1286-1293, 2007.
- [9] F. Meng, X. Xu and L. Gao, «A Simple Harmonic Reduction Method in Multipulse Rectifier Using Passive Devices», *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 13, pp. 2680-2692, 2017.
- [10] S. Khan, X. Zhang, M. Saad, H. Ali, Khan B. Muhammad and H. Zaman, «Comparative Analysis of 18-Pulse Autotransformer Rectifier Unit Topologies with Intrinsic Harmonic Current Cancellation», *Energies*, vol. 11, no. 6, pp. 1-18, 2018.
- [11] T. Yang, S. Bozhko, P. Wheeler, S. Wang and S. Wu, «Generic functional modelling of multi-pulse auto-transformer rectifier units for more-electric aircraft applications», *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, no. 5, pp. 883-891, 2018.