

УДК 624.314

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.08

## 18-ПУЛЬСНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С ЭЛЕКТРОННЫМ СДВИГОМ ФАЗ И СОГЛАСУЮЩИМ АВТОТРАНСФОРМАТОРОМ

**Е. И. СОКОЛ, В. В. ЗАМАРУЕВ, О. А. БУТОВА, Ю. С. ВОЙТОВИЧ**

кафедра «Промышленной и биомедицинской электроники», НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА  
email: VoitovychYS@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Для снижения гармонических искажений входного тока, применяются многопульсные выпрямители, требующие наличия фазосдвигающих трансформаторов либо автотрансформаторов. Исключение электромагнитных фазосдвигающих устройств при сохранении малых гармонических искажений входного тока и получении близкого к единице коэффициента мощности, возможно при использовании электронного сдвига фаз. В статье рассмотрены принципы построения многопульсных выпрямителей с электронным сдвигом фаз, который осуществляется средствами самого выпрямителя: введением положительных и отрицательных углов управления. В этом случае, для выравнивания токов отдельных выпрямителей может применяться как повышение напряжения на входе выпрямителей, работающих с большими углами управления, так и понижение входного или выходного напряжения выпрямителей, работающих с меньшими углами управления. Проведено сравнение выпрямителей с использованием повышающих и понижающих автотрансформаторов. Получены данные об установленной мощности автотрансформаторов, мощности потерь. Приведены результаты теплофизического моделирования.

**Ключевые слова:** электронный сдвиг фаз; автотрансформатор; угол управления; коэффициент мощности; коэффициент гармонических искажений тока; выпрямитель.

## 18-PULSE RECTIFIER WITH ELECTRONIC PHASE SHIFTING AND MATCHING AUTOTRANSFORMER

**E. SOKOL, V. ZAMARUEV, O. BUTOVA, Yu. VOITOVYCH**

Department of Industrial and Biomedical Electronics, NTU "KhPI", Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** To reduce harmonic distortion of the input current, multipulse rectifiers are used. They require the presence of phase-shifting transformers or autotransformers. Elimination of electromagnetic phase-shifting devices while maintaining small harmonic distortion of the input current and obtaining a power factor close to unity is possible with the use of electronic phase shift. The electronic phase shift is realized by means of the rectifier itself: the introduction of positive and negative control angles in the pairs of rectifiers' modules. At present, 12-pulse rectifiers with electronic phase shift are known. Unlike classic rectifiers, they do not use phase-shifting transformers and have a unit power factor. Increasing of the rectifier's pulse makes it possible to improve the harmonic composition of the input current. The use of the principle of electronic phase shift in 18-pulse rectifier leads to different levels of constant voltage at the output of the rectifiers. In this case, to equalize the currents of rectifiers' modules, one can use both an increase the voltage at the input of rectifiers operating with large control angles and a decrease the input voltage of the rectifiers operating with smaller control angles. The principles of constructing of matching autotransformers for the 18-pulse rectifier with an electronic phase shift are considered in the article. Comparison of 18-pulse rectifiers with use of step-up and step-down autotransformers is made. Data on the installed capacity of autotransformers, power losses are obtained. The results of thermophysical modeling are presented. When comparing the parameters of the matching magnetic elements, it can be concluded that it is more appropriate to use a step-down autotransformer.

**Keywords:** Electronic phase shift; autotransformer; angle of control; power factor; THDi; rectifier.

### Введение

Использование классических неуправляемых выпрямителей приводит к значительным искажениям потребляемого тока. Уменьшить искажения можно при помощи повышения пульсности выпрямителя, что ведет за собой необходимость использования фазосдвигающих трансформаторов, которые ухудшают массогабаритные и ценовые показатели преобразователя. Другим способом уменьшения искажений потребляемого тока является использование преобразователей с высокочастотной модуляцией [1, 2, 3]. Эти преобразователи обеспечивают потребление тока, удовлетворяющего

требованиям по качеству потребляемой электроэнергии в диапазоне 50 Гц-2500 Гц [4], но вносят существенные возмущения в частотных диапазонах 2500-10000 Гц, 10 кГц-150 кГц и 150 кГц-30 МГц. Возмущения в этих диапазонах должны соответствовать требованиям по электромагнитной совместимости и электромагнитному окружению. Формирование входного тока, удовлетворяющего вышеприведенным требованиям, возможно при использовании многопульсных выпрямителей с электронным сдвигом фаз, исключив при этом применение электромагнитных фазосдвигающих устройств.

**Цель работы**

Целью работы является сравнение массогабаритных показателей согласующих автотрансформаторов для выравнивания выходных напряжений выпрямительных модулей 18-пульсного выпрямителя с электронным сдвигом фаз, который работает на общую нагрузку мощностью  $P = 90$  кВт. Входным источником питания является промышленная сеть 380 В, 50 Гц.

**Изложение основного материала**

При отсутствии трансформатора с несколькими обмотками или фазосдвигающего автотрансформатора, обеспечить многопульсный режим выпрямителя можно при использовании управляемых выпрямителей, работающих с отрицательными и положительными углами управления [5, 6]. Для 18-пульсной системы соответствующие углы управления равны  $0$  и  $\pm 20$  эл. град.

На рис. 1 показана предлагаемая схема выпрямителя с электронным сдвигом фаз с согласующим устройством. Согласующее устройство позволяет, при необходимости, выровнять выходные напряжения выпрямительных модулей.

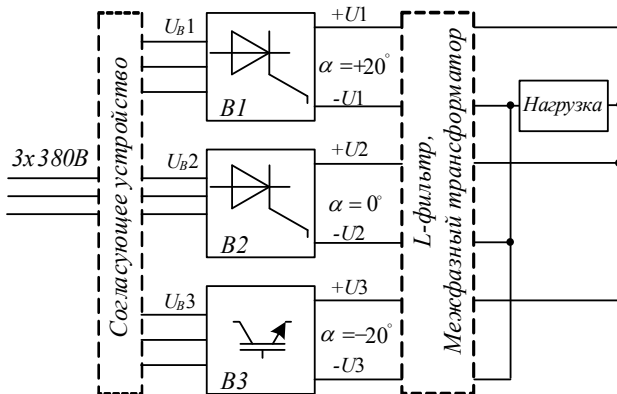


Рис. 1 – Схема выпрямителя с электронным сдвигом фаз

Схема управляемого выпрямителя  $B1$  приведена на рис. 3. В качестве силовых ключей могут использоваться тиристорные модули  $SKKT 106/14E$  [7], объединяющие анодный и катодный тиристоры стоек выпрямителя.

Схема выпрямителя  $B2$  может быть выполнена как на диодах (диодных модулях), так и на тиристорах с нулевым углом управления. С целью исключения пусковых бросков тока, для плавного пуска выпрямителя на емкостную нагрузку, целесообразно использовать для выпрямителя  $B2$  ту же схему, что и для выпрямителя  $B1$ .

Для обоих выпрямителей в качестве силовых ключей могут использоваться тиристорные модули

$SKKT106/14E$ , объединяющие анодный и катодный тиристоры стоек выпрямителя. Управление тиристорами в установившемся режиме осуществляется с углом управления  $0$  эл. град, т.е. они работают аналогично диодам.

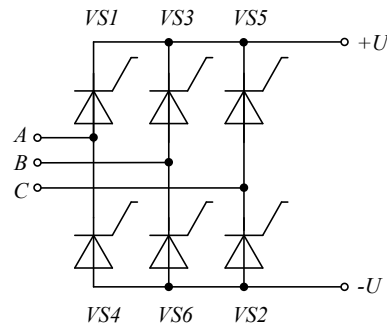


Рис. 2 – Схема управляемого выпрямителя  $B1$  и  $B2$

Схема выпрямителя  $B3$  может быть выполнена на любых полностью управляемых ключах с обратной блокирующей способностью, например, симметричных  $GTO$ -тиристорах,  $IGBT$  с последовательным диодом и др. Схема выпрямителя  $B3$  приведена на рис. 3. Могут быть использованы  $IGBT$  модули  $SKM300GBD12T4$  [8], объединяющие анодный и катодный ключи стоек выпрямителя.

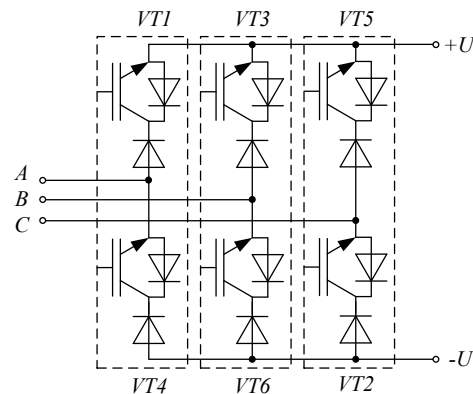


Рис. 3 – Схема управляемого выпрямителя  $B3$

Поскольку выпрямители  $B1$  и  $B3$  работают с углами управления  $20$  эл. град., а выпрямитель  $B2$  – неуправляемый, то при подаче на вход выпрямителей одинакового напряжения  $U_{B1} = U_{B2} = U_{B3}$  (рис. 1) выпрямленные напряжения  $U1$  и  $U3$  будут меньше выпрямленного напряжения  $U2$ , в соответствии с углом управления  $20$  эл. град., на  $6\%$ .

Разность выпрямленных напряжений устраняется применением повышающего или понижающего трехфазного согласующего трансформатора, что входит в задачи согласующего устройства.

**Обсуждение результатов**

*1. Выпрямитель с электронным сдвигом фаз и повышающим согласующим трансформатором.*

Схема 18-пульсного выпрямителя с повышающим согласующим трансформатором приведена на рис. 4. Для выравнивания выходного напряжения выпрямительных мостов, на входе 18-пульсного выпрямителя используется входной автотрансформатор *TV1*, повышающий входное напряжение выпрямителей *B1* и *B3* на 6%. При этом средние значения выпрямленных напряжений *U1*, *U2* и *U3* равны между собой и соответствуют номинальному напряжению сети питания, а автотрансформатор повышает входное напряжение двух выпрямителей (67% мощности нагрузки).

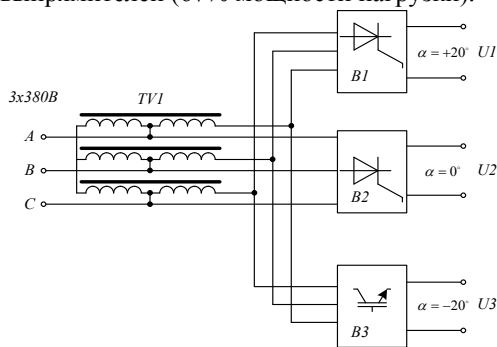


Рис. 4 – Схема 18-пульсного выпрямителя с повышающим согласующим трансформатором

Как видно из рис. 4, повышающий автотрансформатор выполнен по схеме звезда (рис. 5), трехфазный источник входного напряжения подключен к точкам *A*, *B*, *C*, а выпрямители *B1* и *B3* к точкам *A'*, *B'*, *C'*.

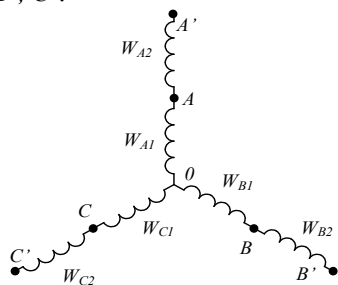


Рис. 5 – Схема соединения обмоток повышающего согласующего автотрансформатора

Исходя из принципа работы автотрансформатора [9, 10], общая мощность обмоток  $P_W$  составляет:

$$P_W = 2 * \frac{1 - \cos(\alpha)}{2 - \cos(\alpha)} * n * P_R \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол управления,  $n$  – количество модулей выпрямителя, подключенных к автотрансформатору ( $n = 2$ ),  $P_R$  – мощность модуля выпрямителя.

$$P_W = 7,5 \text{ кВт},$$

что соответствует установленной мощности трансформатора 3,75 кВт, или 4% от мощности нагрузки.

Сердечник 3-UI-132a [11] обладает близкими к требуемым параметрам. При использовании данного сердечника приблизительная масса трансформатора составляет 23 кг, из них масса стали составляет 11,4 кг, а масса меди – 10,4 кг при индукции в сердечнике 1,5 Тл и плотности тока 3 А/мм<sup>2</sup>.

Параметры оцениваемого автотрансформатора: количество витков первичной обмотки  $W_1 = 352$ , провод ПЭТВ 1,62; количество витков вторичной обмотки  $W_2 = 22$ , провод 12,0x2,5. Потери в стали составляют 30 Вт, в меди – 230 Вт.

Для сравнения автотрансформаторов в САПР *SOLIDWORKS Flow Simulation* было проведено их теплофизическое моделирование при температуре окружающей среды 50°C и допущении, что обмотки трансформаторов является монолитными. Моделируется естественное и принудительное охлаждение трансформатора со скоростью потока воздуха 6 м/с направленной вертикально вниз. При естественном охлаждении температура повышающего автотрансформатора не превышает 145°C (рис. 6). Наибольшую температуру имеет центральная обмотка в зоне, находящейся внутри магнитопровода. Температура сердечника достигает 120 °C.

Полученный перегрев обмотки согласуется с данными производителя сердечников, приводящего тепловое сопротивление обмотки сердечника 3-UI-132a –  $R_{thCu} = 1,04$  град/Вт, что дает ожидаемую температуру обмотки 130 °C при потерях в обмотке 77 Вт, температура сердечника – существенно выше ожидаемой.

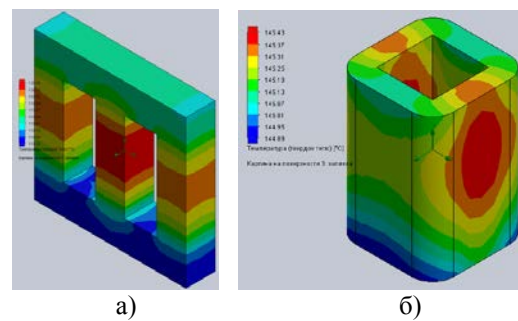


Рис. 6 – Результаты теплофизического моделирования повышающего согласующего автотрансформатора с сердечником 3-UI-132a при естественном охлаждении:

а) температура сердечника, б) температура средней катушки

Как показало моделирование, при принудительном охлаждении, температура обмотки автотрансформатора не превышает 102 °C, сердечника – 78 °C (рис. 7).

Параметры повышающего согласующего автотрансформатора сведены в таблицу.

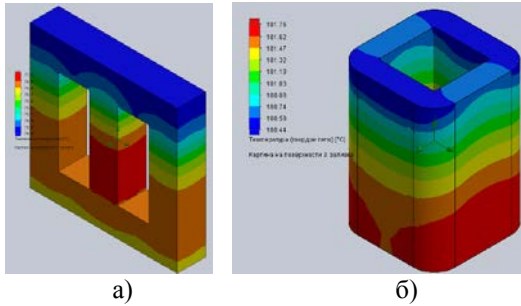


Рис. 7 – Результаты теплофизического моделирования повышающего согласующего автотрансформатора с сердечником 3-UI-132a и принудительного охлаждения:

а) температура сердечника, б) температура средней катушки

2. Выпрямитель с электронным сдвигом фаз и понижающим согласующим трансформатором.

Для выравнивания выходного напряжения выпрямительных мостов, на входе 18-пульсного выпрямителя можно так же использовать входной автотрансформатор *TV1*, понижающий входное напряжение выпрямителя *B2* на 6% (рис. 8). При этом средние значения выпрямленных напряжений *U1*, *U2* и *U3* равны между собой, но на 6% меньше максимально возможного значения, получаемого в случае использования повышающего автотрансформатора, а автотрансформатор понижает входное напряжение одного выпрямителя (33% мощности нагрузки).

$$P_W = 2 * (1 - \cos(\alpha)) * P_R \quad (2)$$

$$P_W = 4 \text{ кВт},$$

что соответствует установленной мощности трансформатора 2 кВт, или 2% от мощности нагрузки.

Понижающий согласующий автотрансформатор имеет вдвое меньшую установленную мощность, чем повышающий, что позволяет использовать сердечник 3-UI-114a [11]. При использовании данного сердечника приблизительная масса автотрансформатора составляет 14 кг, из них масса стали составляет 10,7 кг, а масса меди – 3,3 кг при индукции в сердечнике 1,5 Тл и плотности тока 3 А/мм<sup>2</sup>.

Схема соединения обмоток понижающего автотрансформатора приведена на рис. 9, трехфазный источник входного напряжения подключен к точкам *A*, *B*, *C*, а выпрямитель *B2* к точкам *A'*, *B'*, *C'*.

Параметры оцениваемого автотрансформатора: количество витков первичной обмотки  $W_1 = 444$ , провод ПЭТВ 1,16; количество витков вторичной обмотки  $W_2 = 29$ , провод 6.0x3,0. Плотность тока 2.8 А/мм<sup>2</sup>. Потери в стали составляют 20 Вт, в меди – 120 Вт.

При естественном охлаждении температура автотрансформатора не превышает 121°C, температура сердечника – 105°C (рис. 10).

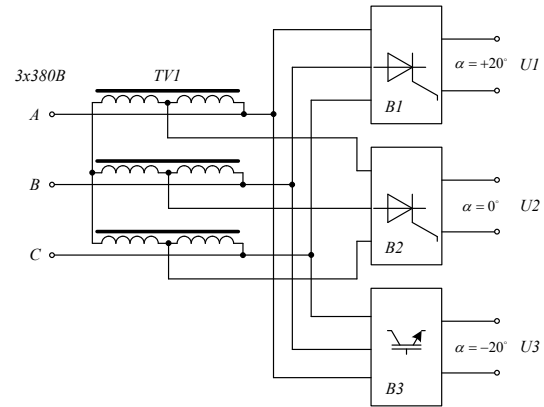


Рис. 8 – Схема 18-пульсного выпрямителя с понижающим согласующим трансформатором

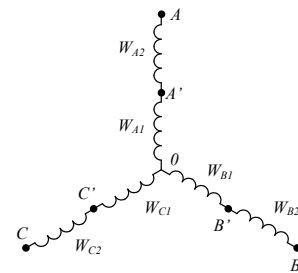


Рис. 9 – Схема соединения обмоток понижающего автотрансформатора

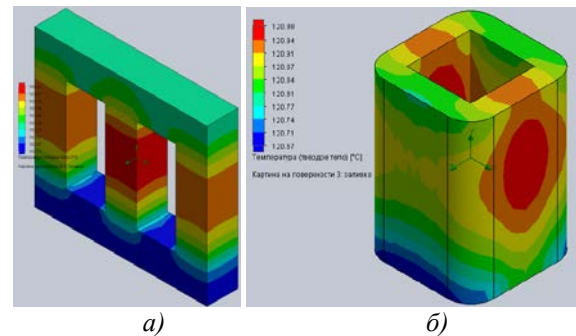


Рис. 10 – Результаты теплофизического моделирования понижающего автотрансформатора с сердечником 3-UI-114a при естественном охлаждении. а) температура сердечника; б) температура средней катушки

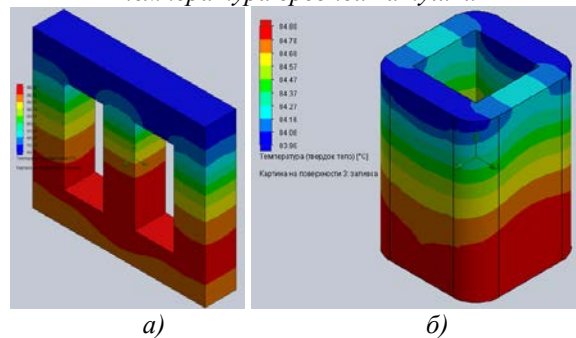


Рис. 11 – Результаты теплофизического моделирования понижающего автотрансформатора с сердечником 3-UI-114a и принудительного охлаждения. а) температура сердечника; б) температура средней катушки

Использование принудительного охлаждения позволило снизить температуру до 85°C и 65°C соответственно (рис. 11).

Использование более легкого сердечника 3-UI-114a [9] позволило снизить массу трансформатора на 9 кг при одновременном снижении потерь на 120 Вт.

Параметры понижающего согласующего автотрансформатора сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов и моделирования автотрансформаторов

Автотр-р	Сердечник	Витки W1	Провод	Витки W2	Провод	Масса стали	Потери в стали	Масса меди	Потери в меди	Масса тр-ра	Температура при 0м/с и 6м/с
Повышающий	3-UI-132a	352	ПЭТВ.62	22	12.0x2.5	11,4	30	10.4	230	23	145/ 102
Понижающий	3 UI 114a	444	ПЭТВ 1.16	29	6.0x3.0	10,7	20	3.3	120	14	121/ 85

Потери в меди превышают значения, приводимые в справочных данных. Это связано с полутора-двукратным превышением рекомендуемой плотности тока обмотки. Однако, использование принудительного охлаждения и тщательная конструктивная проработка автотрансформатора позволяют полностью использовать потенциал сердечника, что существенно для преобразовательных систем с повышенными требованиями к массогабаритным параметрам.

### Выводы

Рассмотрены две схемы 18-пульсного выпрямителя с электронным сдвигом фаз и согласующими автотрансформаторами.

Установлено, что в случае работы 18-пульсного выпрямителя на общую нагрузку 90 кВт при температуре окружающей среды 50°C масса согласующего повышающего автотрансформатора равна 23 кг, максимальная температура при естественном охлаждении составляет 145°C, а при принудительном охлаждении – 102°C.

В 18-пульсном выпрямителе с понижающим автотрансформатором масса согласующего автотрансформатора составляет 14 кг, его максимальная температура при естественном охлаждении составляет 121°C, а при принудительном охлаждении – 85°C.

При сравнении показателей согласующих магнитных элементов можно сделать вывод, что

более целесообразным является использования понижающего автотрансформатора, масса которого почти в два раза ниже повышающего автотрансформатора, мощность потерь существенно меньше, а тепловые характеристики – лучше.

### Список литературы

- Hu, W. Research on reducing the input current distortion based on PWM method for Vienna rectifier with LCL filter / W. Hu, A. Yu, J. Lyu, H. Ding, J. Lyu // *Chinese Automation Congress (CAC)*. – 2017. – p. 6634–6639. – doi: 10.1109/CAC.2017.8243972.
- Jang, Y. A. A comparative study of single-switch three-phase high-power-factor rectifiers / Y. Jang, M. M. Jovanovic // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1998. – 34. – 6. – p. 1327–1334. – doi: 10.1109/28.739018.
- Prasad, A. R. An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers / A.R. Prasad, P. D. Ziogas, S. Manias // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 1991. – 6. – 1. – p. 83–92. –doi: 10.1109/63.65006.
- IEEE Std 519TM-2014 / IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (Revision of IEEE Std 519-1992). – 2014.
- Sokol, Y. I. Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier / Y. I. Sokol, V. V. Zamaruiev, V. V. Ivakhno, Y. S. Voitovysh // *Electrical, Control and Communication Engineering*. – 12(1). – 2017. – p. 5–10. – doi: 10.1515/cece-2017-0001.
- Сокол. Е. И. Новый бестрансформаторный многопульсный выпрямитель с электронным сдвигом фаз / Е. И. Сокол, В. В. Замаруев, В. В. Ивахно, О. А. Бутова, Ю. С. Войтович // *Журнал «Электротехніка та електромеханіка». Спеціальний випуск до XXII Міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка та Енергоефективність»*. – Том II. – 2016/4(2). – С. 81–86.
- URL: [http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON\\_DataSheet\\_SKKT\\_106\\_14\\_E\\_07897491.pdf](http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON_DataSheet_SKKT_106_14_E_07897491.pdf).
- URL: [http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON\\_DataSheet\\_SKM300GBD12T4\\_22892212.pdf](http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON_DataSheet_SKM300GBD12T4_22892212.pdf)
- Avery, A. H. Auto Transformer Design / A. H. Avery. E.&F.N.Spon, Ltd. London. – 1909. URL: <https://archive.org/details/AutoTransformerDesignAvery>.
- Patel, S. Y. Special Designs Auto-Transformers / S. Y. Patel, L. E. Peer // *IEEE PES Chicago Chapter*. – 2014. URL: [http://www.ece.iit.edu/~flueck/chicago\\_pes/2014/PES-Oct8-SpecialDesigns-Autotransformers.pdf](http://www.ece.iit.edu/~flueck/chicago_pes/2014/PES-Oct8-SpecialDesigns-Autotransformers.pdf).
- URL: [https://www.grau-stanzwerk.de/d-wAssets/docs/produkte/3-ui-kernbleche/Mech\\_Elekt\\_Daten.pdf](https://www.grau-stanzwerk.de/d-wAssets/docs/produkte/3-ui-kernbleche/Mech_Elekt_Daten.pdf).

### Bibliography (transliterated)

- Hu, W., Yu, A., Lyu, J., Ding, H., Lyu, J. Research on reducing the input current distortion based on PWM method for Vienna rectifier with LCL filter. *Chinese Automation Congress (CAC)*, 2017, 6634–6639, doi: 10.1109/CAC.2017.8243972.
- Jang, Y. A., Jovanovic, M. M. A comparative study of single-switch three-phase high-power-factor rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, 34, 6, 1327–1334, doi: 10.1109/28.739018.

3. **Prasad, A. R., Ziogas, P. D., Manias, S.** An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1991, 6, 1, 83-92, doi: 10.1109/63.65006.
4. IEEE Std 519TM-2014 / IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (Revision of IEEE Std 519-1992), 2014.
5. **Sokol, Y. I., Zamaruev, V. V., Ivakhno, V. V., Voitovych, Y. S.** Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 12(1), 2017, 5–10, doi:10.1515/ecce-2017-0001.
6. **Sokol, E. I., Zamaruev, V. V., Ivahno, V. V., Butova, O. A., Voytovich, Yu. S.** Novyyi bestransformatornyiy mnogopulsnyiy vypryamitel s elektronnyim sdvigom faz. *Elektrotehnika ta elektromexanika. Special'nyj vy'pusk do XXII Mizhnarodnoyi naukovo-technichnoyi konferenciyi «Sy'lova elektronika ta Energoefekty`vnist'»*, II, 2016/4(2), 81–86.
7. Available at: [http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON\\_DataSheet\\_SKKT\\_106\\_14\\_E\\_07897491.pdf](http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON_DataSheet_SKKT_106_14_E_07897491.pdf).
8. Available at: [http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON\\_DataSheet\\_SKM300GBD12T4\\_22892212.pdf](http://shop.semikron.com/out/media/ds/SEMIKRON_DataSheet_SKM300GBD12T4_22892212.pdf).
9. **Avery, A. H.** Auto Transformer Design. E.&F.N.Spon, Ltd. London, 1909. Available at: <https://archive.org/details/AutoTransformerDesignAvery>.
10. **Patel, S. Y., Peer, L. E.** Special Designs Auto-Transformers. *IEEE PES Chicago Chapter*, 2014. Available at: [http://www.ece.iit.edu/~flueck/chicago\\_pes/2014/PES-Oct8-SpecialDesigns-AutoTransformers.pdf](http://www.ece.iit.edu/~flueck/chicago_pes/2014/PES-Oct8-SpecialDesigns-AutoTransformers.pdf).
11. Available at: [https://www.grau-stanzwerk.de/d-wAssets/docs/produkte/3-ui-kernbleche/Mech\\_Elekt\\_Daten.pdf](https://www.grau-stanzwerk.de/d-wAssets/docs/produkte/3-ui-kernbleche/Mech_Elekt_Daten.pdf).

### Сведения об авторах (About authors)

**Сокол Євген Іванович** – доктор технічних наук, член-кореспондент Національної академії наук України, професор, ректор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Промислова і біомедична електроніка», м. Харків, Україна; e-mail: sokol@kpi.kharkov.ua.

**Yevgen Sokol** – Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, Rector, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Head of the Department of Industrial and Biomedical Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: sokol@kpi.kharkov.ua.

**Замаруєв Володимир Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Промислова і біомедична електроніка», м. Харків, Україна; e-mail: vvz1@ukr.net.

**Volodymyr Zamaruev** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Docent, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Industrial and Biomedical Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: vvz1@ukr.net.

**Бутова Ольга Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Промислова і біомедична електроніка», м. Харків, Україна; e-mail: cherie\_2812@gmail.com.

**Olha Butova** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Industrial and Biomedical Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: cherie\_2812@gmail.com.

**Войтович Юрій** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Промислова і біомедична електроніка», м. Харків, Україна; e-mail: VoitovychYS@gmail.com.

**Yurii Voitovych** – graduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Industrial and Biomedical Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: VoitovychYS@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Сокол, Е. И.** 18-пульсный выпрямитель с электронным сдвигом фаз и согласующим автотрансформатором / **Е. И. Сокол, В. В. Замаруев, О. А. Бутова, Ю. С. Войтович** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 57-62. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.08.

*Please cite this article as:*

**Sokol, E., Zamaruev, V., Butova, O., Voitovych, Yu.** 18-pulse rectifier with electronic phase shifting and matching autotransformer. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **26** (1302), 1, 57-62, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.08.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Сокол, Е. І.** 18-пульсний випрямляч з електронним зсувом фаз та узгоджувальним автотрансформатором / **Е. І. Сокол, В. В. Замаруєв, О. А. Бутова, Ю. С. Войтович** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 57-62. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.08.

**АНОТАЦІЯ** Для зниження гармонійних спотворень вхідного струму, застосовуються багатопульсні випрямлячі, що вимагають наявності фазозсуваючих трансформаторів або автотрансформаторів. Виключення електромагнітних фазозсуваючих пристроїв при збереженні малих гармонійних спотворень вхідного струму і отриманні близького до одиниці коефіцієнта потужності, можливо при використанні електронного зсуву фаз. У статті розглянуті принципи побудови багатопульсних випрямлячів з електронним зсувом фаз, який здійснюється засобами самого випрямляча: введенням позитивних і негативних кутів керування. У цьому випадку, для вирівнювання струмів окремих випрямлячів може застосовуватися як підвищення напруги на вході випрямлячів, що працюють з великими кутами керування, так і зниження вхідної або вихідної напруги випрямлячів, що працюють з меншими кутами керування. Проведено порівняння випрямлячів з використанням підвищувальних і понижувальних автотрансформаторів. Отримано дані про встановлені потужності автотрансформаторів та потужності втрат. Наведено результати теплофізичного моделювання.

**Ключові слова:** електронний зсув фаз; автотрансформатор; кут керування; коефіцієнт потужності; коефіцієнт гармонійних спотворень струму; випрямляч.

Поступила 03.07.2018