

АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТОКА В СХЕМАХ ДВАДЦАТИЧЕТЫРЕХПУЛЬСНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Д. С. КРЫЛОВ*, О. И. ХОЛОД

кафедра промышленной и биомедицинской электроники, НТУ «ХПИ», Харьков, Украина

* denis77ks@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Основная часть электроэнергии потребляется в преобразованном виде и применение схем полупроводниковых преобразователей для получения заданных параметров нагрузки увеличивается. В рамках энергосбережения повышаются требования к качеству полупроводниковых преобразователей, их влиянию на питающую сеть, нагрузку и смежных потребителей. Для преобразования переменного напряжения в постоянное широко используются схемы, выполненные на базе однооперационных тиристоров. Их существенным недостатком является плохая электромагнитная совместимость с питающей сетью. Для ее улучшения и повышения коэффициента полезного действия применяют многопульсные схемы выпрямителей. При большой мощности нагрузки, а также, когда предъявляются особые требования к гармоническому составу выходного напряжения и потребляемого из сети тока, могут использоваться двадцатичетырехпульсные схемы управляемых выпрямителей, которые позволяют снизить потери электроэнергии не только в выпрямителях, но и в питающих сетях и смежных потребителях за счет снижения влияния искажений на качественные характеристики сетей со стороны нелинейной нагрузки, которой является выпрямитель. Пропорционально увеличению пульсности выпрямленного напряжения снижаются массогабаритные и стоимостные показатели сглаживающих фильтров в сетях постоянного тока. В данной работе выполнено компьютерное моделирование симметричной и асимметричной схем двадцатичетырехпульсных управляемых выпрямителей. Анализ результатов моделирования показал, что при одинаковом числе пульсаций в выходном напряжении и полной симметрии схем с точки зрения нагрузки, формы кривых сетевых токов различаются. При проведении виртуального эксперимента стало очевидно, что для асимметричной схемы амплитуды высших гармоник во всем диапазоне изменения углов управления стабильно ниже амплитуд гармоник для симметричной схемы и асимметричная схема является перспективной для применения на практике, не смотря на необходимость использования двух разных типов структур трансформаторов.

Ключевые слова: двадцатичетырехпульсный управляемый выпрямитель; симметричная схема; асимметричная схема; неосновные гармоники; MatLab-модель; энергосбережение; электромагнитная совместимость; виртуальный эксперимент

ANALYSIS OF THE NETWORK CURRENT IN CIRCUITS TWENTY-FOUR PULSE CONTROLLED RECTIFIERS

D. KRYLOV*, O. KHOLOD

Department of industrial and biomedical electronics, NTU "KPI", Kharkiv, Ukraine

* denis77ks@gmail.com

ABSTRACT. The main part of the electric power is consumed in a transformed form and the use of semiconductor converter circuits for obtaining the specified parameters of the load increases. As part of energy savings, the requirements for the quality of semiconductor converters, their impact on the supply network, the load and related consumers are increasing. To convert AC voltage to DC widely used circuits, made on the basis of single-operation thyristors. Their significant drawback is poor electromagnetic compatibility with the supply network. To improve it and increase its efficiency, multi-pulse rectifier circuits are used. With a high load power, as well as when special requirements are imposed on the harmonic composition of the output voltage and current consumed from the network, twenty-four-pulse controlled rectifier circuits can be used, which can reduce power losses not only in rectifiers, but also in power supply networks and adjacent consumers due to reducing the effect of distortion on the quality characteristics of networks from the non-linear load, which is the rectifier. In proportion to the increase in the pulsation of the rectified voltage, the weight and size and cost parameters of the smoothing filters in DC networks are reduced. In this paper, a computer simulation of the symmetric and asymmetric circuits of twenty-four-pulse controlled rectifiers was performed. Analysis of the simulation results showed that with the same number of ripples in the output voltage and full symmetry of the circuits in terms of load, the shapes of the network current curves are different. When conducting a virtual experiment, it became obvious that for an asymmetric scheme the amplitudes of higher harmonics in the entire range of control angles are consistently lower than the amplitudes of harmonics for a symmetric scheme and the asymmetric scheme is promising for practical use, despite the need to use two different types of transformers.

Keywords: twenty-four-pulse controlled rectifier; symmetrical circuit, asymmetrical circuit, the non-primary harmonics; MatLab-model; energy efficiency; electromagnetic compatibility; virtual experiment

Введение

Основная часть электроэнергии потребляется в преобразованном виде и применение полупроводниковых преобразователей для получения заданных параметров нагрузки стремительно увеличивается. В рамках энергосбережения повышаются требования к качеству полупроводниковых преобразователей, их влиянию на питающую сеть, нагрузку и смежных потребителей. Для преобразования переменного напряжения в постоянное широко используются преобразователи, выполненные на базе однооперационных тиристоров. Недостатками этих преобразователей являются плохая электромагнитная совместимость с питающей сетью, низкий коэффициент мощности при регулировании напряжения в сторону снижения, жесткая связь с питающей сетью, необходимость в сглаживающих фильтрах на стороне нагрузки. Для улучшения электромагнитной совместимости с питающей сетью и повышения коэффициента полезного действия применяют многопульсные схемы управляемых выпрямителей [1-3]. При большой мощности нагрузки, когда предъявляются жесткие требования к гармоническому составу выходного напряжения и потребляемого из сети тока, используют 24-х пульсные схемы управляемых выпрямителей. Они позволяют снизить потери электроэнергии в питающей сети за счет снижения влияния искажений на качественные характеристики сети со стороны нелинейной нагрузки, которой является выпрямитель. Пропорционально увеличению пульсности выпрямленного напряжения снижаются массогабаритные и стоимостные показатели сглаживающих фильтров на стороне тока.

Цель работы

Известны две основные схемы 24-х пульсных управляемых выпрямителей, которые отличаются между собой лишь способом соединения трансформаторных обмоток [4-6]. При этом предпочтение, обычно, отдается структуре с симметричным фазовым сдвигом напряжений относительно питающей сети. Однако существует асимметричная структура, в которой форма потребляемого преобразователем тока несколько отличается от формы тока в симметричной схеме, что представляет практический интерес для изучения и исследования данной схемы. Целью данной статьи является создание математической модели симметричной и асимметричной схем 24-х пульсных управляемых выпрямителей для исследования гармоник сетевого тока в них.

Изложение основного материала

Для обеспечения 24-х пульсного режима работы во входной цепи схемы управляемого выпрямителя необходимо обеспечить фазовый сдвиг в 15 ел. град. между трехфазными системами линейных

напряжений вентильных обмоток трансформаторов [7, 8]. В симметричной структуре, состоящей из четырех двухобмоточных трансформаторов, сетевые обмотки соединены в «зигзаг», для обеспечения фазового сдвига на $+7.5$ и -7.5 эл. град. соответственно. Вентильные обмотки трансформаторов соединены в звезду и в треугольник [9, 10]. Отметим, что в трансформаторе с фазовым сдвигом «зигзаг» на $+7.5$ эл. град., «треугольник» должен иметь фазовый сдвиг -30 эл. град., а в трансформаторе с фазовым сдвигом «зигзаг» на -7.5 эл. град., «треугольник» должен иметь фазовый сдвиг $+30$ эл. град. соответственно. В результате на вентильных обмотках выходят симметричные трехфазные системы напряжений с фазовым сдвигом относительно сетевого в -22.5 , $+7.5$, $+22.5$ и -7.5 эл. град. Очевидно, что данные системы трехфазных напряжений имеют фазовый сдвиг друг относительно друга в 15 эл. град., что обеспечивает 24-х пульсный режим работы во входной цепи. Также можно отметить, что выбранный режим питания имеет фазовые сдвиги, симметричные относительно питающей сети. Нагляднее это можно увидеть на векторной диаграмме, приведенной на рис. 1, а.

В асимметричной структуре используют четыре двухобмоточных трансформатора с соединением сетевых обмоток в «зигзаг» и «звезду», а вентильных – в «звезду» и «треугольник» таким образом, чтобы обеспечить питающей системе фазовый сдвиг в 15 градусов, но относительно сети питания с несимметричным смещением [11, 12]. На рис. 1, б приведена векторная диаграмма напряжений в асимметричной схеме.

В отличие от симметричного сдвига между фазами напряжения вентильных групп, не симметричный сдвиг в схеме «треугольник-звезда-треугольник», «зигзаг-звезда-треугольник» интересен тем, что форма потребляемого преобразователем тока несколько отличается от формы тока в предыдущей схеме. Это представляет практический интерес для исследования данной схемы и сравнения двух схем по сетевому току с последующим изучением полученных результатов и применением их в проектировании преобразова-

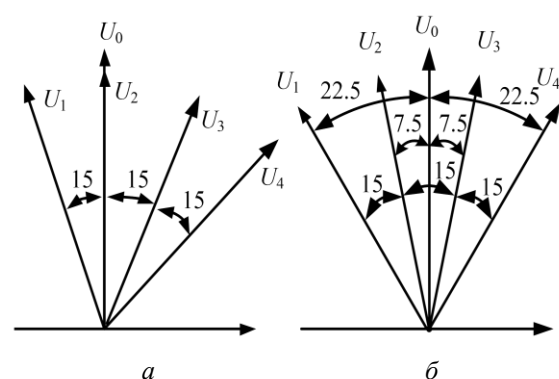


Рис. 1 – Векторная диаграмма напряжения в вентильных группах симметричной и асимметричной схем

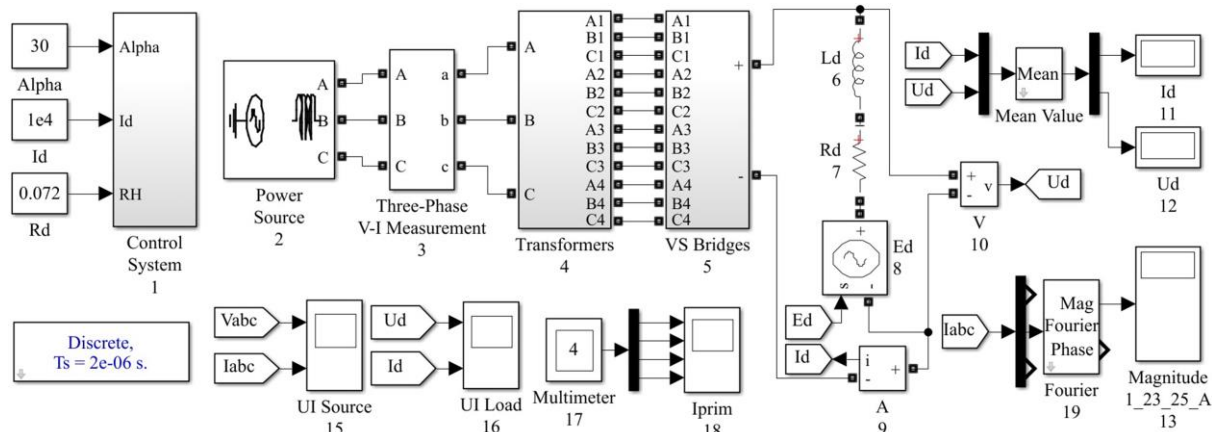


Рис. 2 – MatLab-модель схемы 24-х пульсного управляемого выпрямителя

телей с минимальным влиянием на сеть.

Обсуждение результатов

На рис. 2 приведена MatLab-модель схемы 24-х пульсного управляемого выпрямителя мощностью 8 МВт.

Модель состоит из девятнадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- силовая схема – блоки 2, 4 – 8;
- система управления – блоки 1;
- датчики тока и напряжения – блоки 3, 9, 10;
- многолучевые осциллографы – блок 15, 16, 18;
- дисплей – блоки 11 – 14;
- вспомогательный блок – 17, 19.

Назначение блоков силовой схемы:

2 – блок промышленной сети, моделирующий трехфазную систему синусоидальных напряжений с возможностью задания действующего значения линейного напряжения сети, активного и индуктивного сопротивлений сети;

4 – блок понижающих трансформаторов, сетевые обмотки которых соединены в «зигзаг», а вентильные – в звезду и в треугольник, если схема симметричная (рис. 3, а), или сетевые обмотки соединены в «зигзаг» и «звезду», а вентильных – в «звезду» и «треугольник», если схема асимметричная (рис. 3, б), что бы таким образом обеспечить фазовый сдвиг в 15 ел. град. между трехфазными системами линейных напряжений вентильных обмоток, что необходимо для работы 24-х пульсного управляемого выпрямителя;

5 – блок шестипульсных мостовых управляемых выпрямителей, соединенных последовательно и работающих на одну общую нагрузку;

6 – 8 – блоки эквивалентной нагрузки, которая представлена индуктивностью, активным сопротивлением и противоЭДС.

Система управления (блок 1) позволяет устанавливать необходимые значения угла управления (α) и поддерживает

значение заданного тока нагрузки постоянным. В этом блоке осуществляет расчет сигнала задания e_{y*} для СИФУ четырех шестипульсных мостов (блоки 5).

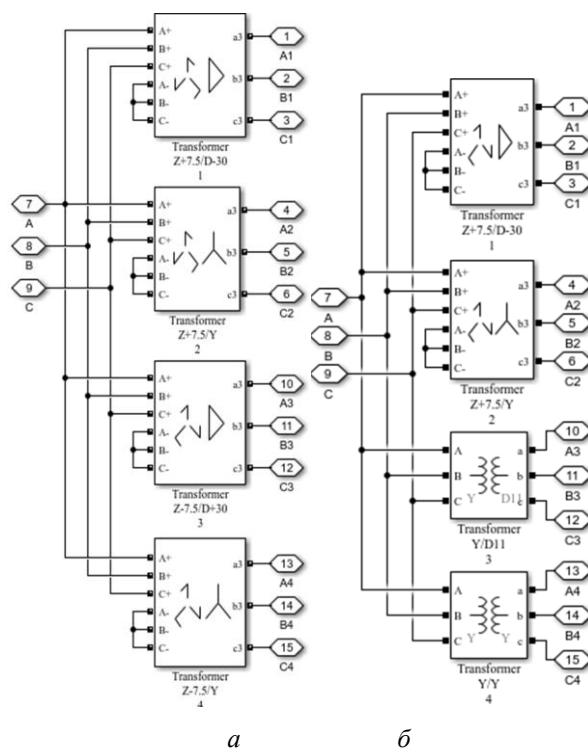


Рис. 3 – MatLab-модели трансформаторов (блок 4) в симметричной и асимметричной схемах

Датчики токов и напряжений осуществляют измерение фазных токов и напряжений питающей сети (блок 3), ток и напряжение нагрузки (блоки 9, 10), а в блоке 17 производится измерение токов фазы А вентильных обмоток трансформаторов. Все эти данные выводятся на многолучевые осциллографы (блок 15, 16, 18).

В блоке 19 выполняется расчет амплитуд и углов сдвига основной и неосновных гармоник сетевого тока (1й, 23й, 25й). Численные значения тока и напряжения нагрузки выводятся на дисплей блоков

Таблица 1 – Результаты измерений

α , эл. град.	Симметричная схема			Асимметричная схема		
	Амплитуда 23й гармоники, А	Амплитуда 25й гармоники, А	Амплитуда 1й гармоники, А	Амплитуда 23й гармоники, А	Амплитуда 25й гармоники, А	Амплитуда 1й гармоники, А
10	4,175	3,494	728,3	3,542	3,934	728,3
20	12,22	8,918	728,4	8,672	5,558	728,2
30	18,94	15,65	728,9	15,87	12,54	728,7
40	22,73	19,58	729,1	20,27	17,04	728,9
50	24,86	21,83	729,2	22,86	19,73	729,1
60	26,09	23,13	729,2	24,38	21,33	729,1
70	26,78	23,88	729,1	25,25	22,25	729
80	27,13	24,24	728,9	25,68	22,71	728,8

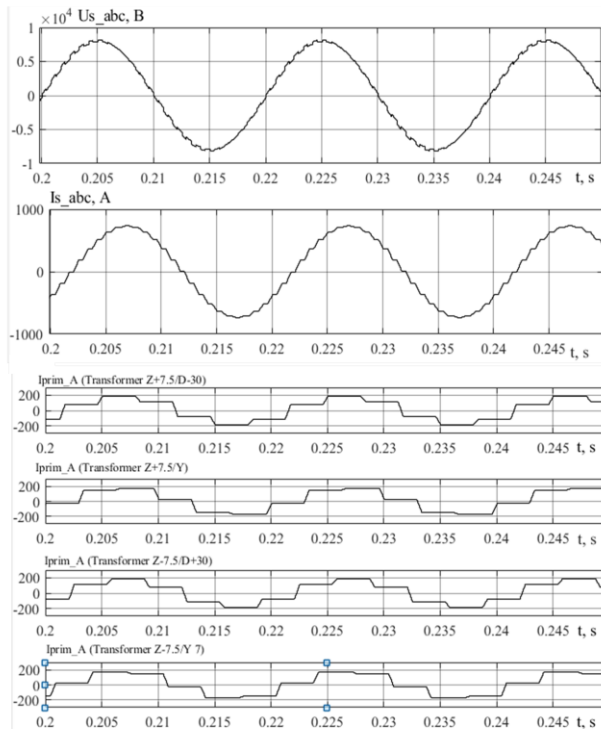


Рис. 4 – Машинограммы сетевого напряжения и тока, токов фазы А вентильных обмоток трансформаторов в симметричной схеме

11, 12, а значения амплитуд 23й и 25й гармоник сетевого тока выводятся на дисплей блока 13.

На рис. 4 и рис. 5 приведены машинограммы,

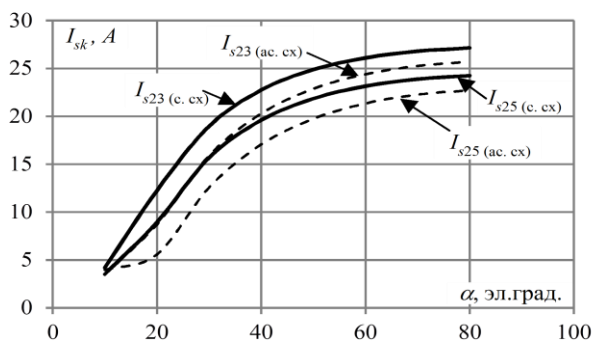


Рис. 6 – Графики зависимости амплитуд гармоник от угла управления

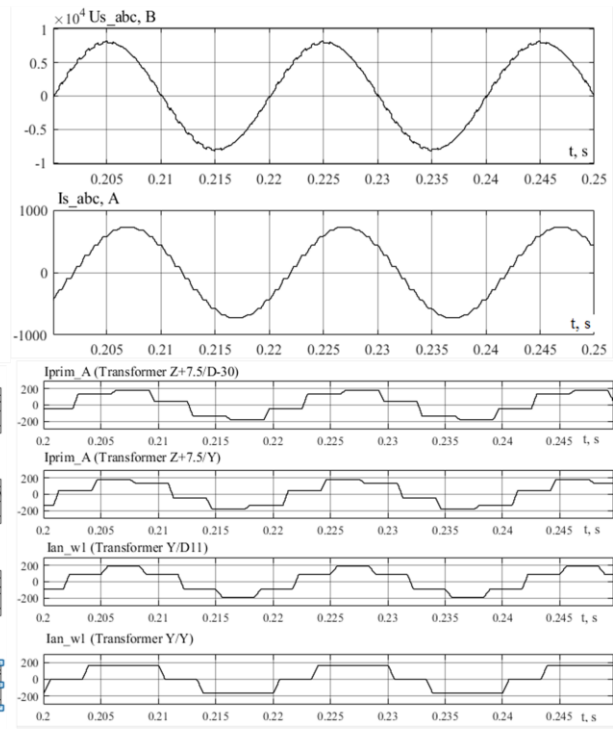


Рис. 5 – Машинограммы сетевого напряжения и тока, токов фазы А вентильных обмоток трансформаторов в асимметричной схеме

которые иллюстрируют работу симметричной и асимметричной схем 24-х пульсного управляемого выпрямителя.

В каждой модели было проведено исследование, при котором изменялся угол управления от 10 до 80 электрических градусов при поддержании тока нагрузки на уровне номинального и проводились измерения амплитуд токов основной гармоники и высших гармоник, характерных для 24-х пульсного выпрямителя, а именно двадцать третьей и двадцать пятой. Все значения измерений представлены в таблице 1 для каждого случая.

По данным таблицы 1 построены графики зависимости значения амплитуд гармоник от угла управления, приведенные на рис. 6.

Выводы

Из результатов моделирования симметричной и асимметричной схем 24-х пульсных управляемых выпрямителей можно сделать вывод, что из-за различных схем соединения обмоток трансформаторов и, следовательно, форм сетевых токов, асимметричная схема имеет меньшие амплитуды высших гармоник сетевого тока и высокие перспективы для применения, несмотря на более широкое распространение симметричной схемы.

Список литературы

1. **Peterson, M.** Modeling and analysis of multipulse uncontrolled/controlled ac-dc converters / **M. Peterson, B. N. Singh** // IEEE conf. ISIE '06, Jul. 2006. – P. 1400-1407.
2. **Alexa D.** An analysis of three-phase rectifiers with near-sinusoidal input currents / D. Alexa, A. Sirbu, D. M. Dobrea // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2004. – № 51. – P. 884-891.
3. **Singh B.** A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters / **B. Singh** // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004 - Vol. 51, № 3. – P. 641-660.
4. **Singh B.** Zigzag connected autotransformer based controlled ac-dc converter with pulse multiplication / **B. Singh, S. Gairola, A. Chandra, K. Alhaddad** // Vigo, Spain, Jun 4-7, 2007. – P. 889-894.
5. **Singh B.** A zigzag connected auto-transformer based 24-pulse AC-DC converter / **B. Singh, S. Gairola** // IEEE Transactions. – 2008.
6. **Sapin A.** Modeling of multi-winding phase shifting transformers applications to DC and multi-level VSI supplies / **A. Sapin, P. Allenbach, J. J. Simond** // ICEM 2000 International Conference on Electrical Machines. – 2000. – P. 465-469.
7. **Gamit K.** Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and it's THD comparison for power quality issues / **K. Gamit, Kh. Chaudhari** // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 03, № 01. – P. 1025-1033.
8. **Sravanthi G.** 24 pulse AC-DC for improved power quality / **G. Sravanthi, D. V. Kumar, I. Ramesh** // International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER). – 2014. – Vol. 4, № 2. – P. 223-228.
9. **Sokol E. I.** Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier / **E. I. Sokol, V. V. Zamaruev, V. V. Ivakhno, Yu. S. Voitovich** // 16th international symposium Pärnu 2017 “Topical problems in the field of electrical and power engineering” and “Doctoral school of energy and geotechnology III” Estonia. – 2017. – P. 160-163.
10. **Sokol E. I.** Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier / **E. I. Sokol, V. V. Zamaruev, V. V. Ivakhno, Yu. S. Voitovich Yu.S.** // The Scientific Journal of Riga Technical University - Electrical, Control and Communication Engineering, Riga. – 2017. – P. 5-10.
11. **Makarov V. O.** 18-pulse Rectifier with Electronic Phase Shifting with Autotransformer in Inverter and Rectifier Mode / **V. O. Makarov, E. S. Pichkalov, Yu. S. Voitovich** // 2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Vilnius. – 2018. – P. 1-5.
12. **Sokol E. I.** 18-Pulse Rectifier with Electronic Phase Shifting and Pulse Width Modulation / **E. I. Sokol, V. V. Zamaruev,**

V. V. Ivakhno, O. A. Butova, V. O. Makarov, Yu. S. Voitovich // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkov. – 2018. – P. 290-294.

References (transliterated)

1. **Peterson, M.** Modeling and analysis of multipulse uncontrolled/controlled ac-dc converters / **M. Peterson, B. N. Singh** // IEEE conf. ISIE '06, Jul. 2006. – P. 1400-1407.
2. **Alexa D.** An analysis of three-phase rectifiers with near-sinusoidal input currents / D. Alexa, A. Sirbu, D. M. Dobrea // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2004. – № 51. – P. 884-891.
3. **Singh B.** A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters / **B. Singh** // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004 - Vol. 51, № 3. – P. 641-660.
4. **Singh B.** Zigzag connected autotransformer based controlled ac-dc converter with pulse multiplication / **B. Singh, S. Gairola, A. Chandra, K. Alhaddad** // Vigo, Spain, Jun 4-7, 2007. – P. 889-894.
5. **Singh B.** A zigzag connected auto-transformer based 24-pulse AC-DC converter / **B. Singh, S. Gairola** // IEEE Transactions. – 2008.
6. **Sapin A.** Modeling of multi-winding phase shifting transformers applications to DC and multi-level VSI supplies / **A. Sapin, P. Allenbach, J. J. Simond** // ICEM 2000 International Conference on Electrical Machines. – 2000. – P. 465-469.
7. **Gamit K.** Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and it's THD comparison for power quality issues / **K. Gamit, Kh. Chaudhari** // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 03, № 01. – P. 1025-1033.
8. **Sravanthi G.** 24 pulse AC-DC for improved power quality / **G. Sravanthi, D. V. Kumar, I. Ramesh** // International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER). – 2014. – Vol. 4, № 2. – P. 223-228.
9. **Sokol E. I.** Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier / **E. I. Sokol, V. V. Zamaruev, V. V. Ivakhno, Yu. S. Voitovich** // 16th international symposium Pärnu 2017 “Topical problems in the field of electrical and power engineering” and “Doctoral school of energy and geotechnology III” Estonia. – 2017. – P. 160-163.
10. **Sokol E. I.** Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier / **E. I. Sokol, V. V. Zamaruev, V. V. Ivakhno, Yu. S. Voitovich Yu.S.** // The Scientific Journal of Riga Technical University - Electrical, Control and Communication Engineering, Riga. – 2017. – P. 5-10.
11. **Makarov V. O.** 18-pulse Rectifier with Electronic Phase Shifting with Autotransformer in Inverter and Rectifier Mode / **V. O. Makarov, E. S. Pichkalov, Yu. S. Voitovich** // 2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Vilnius. – 2018. – P. 1-5.
12. **Sokol E. I.** 18-Pulse Rectifier with Electronic Phase Shifting and Pulse Width Modulation / **E. I. Sokol, V. V. Zamaruev, V. V. Ivakhno, O. A. Butova, V. O. Makarov, Yu. S. Voitovich** // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkov. – 2018. – P. 290-294.

Сведения об авторах (About authors)

Крылов Денис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis77ks@gmail.com.

Denis Krylov – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis77ks@gmail.com.

Холод Ольга Игоревна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; e-mail: olha.kovalchuk86@gmail.com.

Olga Kholod – Candidate of Technical Sciences, Assistant, Department of of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; e-mail: olha.kovalchuk86@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Крылов, Д. С. Анализ сетевого тока в схемах двадцатичетырех пульсных управляемых выпрямителей / **Д. С. Крылов, О. И. Холод** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 78-83. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.11.

Please cite this article as:

Krylov, D., Kholod, O. Analysis of the network current in circuits of twenty-four pulse controlled rectifiers. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 20 (1345), 78-83, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.11.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крылов, Д. С. Аналіз струму мережі в схемах двадцятичотирьох пульсних керованих випрямлячів / **Д. С. Крылов, О. І. Холод** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 78-83. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.11.

АННОТАЦИЯ. Основна частина електроенергії споживається в перетвореному вигляді і застосування схем напівпровідникових перетворювачів для отримання заданих параметрів навантаження збільшується. В рамках енергозбереження підвищуються вимоги до якості напівпровідникових перетворювачів, їх впливу на живильну мережу, навантаження і суміжних споживачів. Для перетворення змінної напруги в постійну широко використовуються схеми, виконані на базі одноопераційних тиристорів. Їх істотним недоліком є погана електромагнітна сумісність з мережею живлення. Для її поліпшення і підвищення коефіцієнта корисної дії застосовують многопульсні схеми випрямлячів. При великій потужності навантаження, а також, коли пред'являються особливі вимоги до гармонійного складу вихідної напруги і споживаного з мережі струму, можуть використовуватися двадцятичотирьохпульсні схеми керованих випрямлячів, які дозволяють знизити втрати електроенергії не тільки в випрямлячах, але і в живильних мережах і суміжних споживачах за рахунок зниження впливу спотворень на якісні характеристики мереж з боку нелінійного навантаження, яким є випрямляч. Паралельно зі збільшенням пульсності випрямленої напруги знижуються масогабаритні і вартісні показники згладжуючих фільтрів в мережах постійного струму. У даній роботі виконано комп'ютерне моделювання симетричної і асиметричної схем двадцятичотирьохпульсних керованих випрямлячів. Аналіз результатів моделювання показав, що при однаковому числі пульсацій в вихідній напрузі і повній симетрії схем з точки зору навантаження, форми кривих струмів мережі розрізняються. При проведенні віртуального експерименту стало очевидно, що для асиметричної схеми амплітуди вищих гармонік у всьому діапазоні зміни кутів управління стабільно нижче амплітуд гармонік для симетричної схеми і асиметрична схема є перспективною для застосування на практиці, не дивлячись на необхідність використання двох різнотипних структур трансформаторів.

Ключові слова: двадцятичотирьохпульсний керований випрямляч; симетрична схема; асиметрична схема; неосновні гармоніки; MatLab-модель; енергозбереження; електромагнітна сумісність; віртуальний експеримент

Надійшла (received) 18.06.2019