

Сакович И.А.¹, Черевко А.И.², Платоненков С.В.²¹ЗАО «Биус»²ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ, ПОСТРОЕННЫМ НА БАЗЕ ТРАНСФОРМАТОРА С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Управляемые выпрямители трехфазного напряжения, выполненные с использованием трансформатора с вращающимся магнитным полем, у которого вторичная N -секционная обмотка представляет собой N -фазный многоугольник или круговую обмотку, а полупроводниковый коммутатор можно уподобить мостовой многоплечной схеме, могут управляться импульсно-фазовыми способами, разработанными для трехфазных мостовых выпрямителей. Одним из новых способов управления выпрямителями на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем, предложенным авторами, стал ступенчато-хордовый способ, позволяющий улучшить электромагнитную совместимость с питающей сетью и нагрузкой по сравнению с классическими способами управления. Регулирование выпрямленного напряжения U_d при этом способе заключается в подключении силовыми ключами коммутатора различного числа секций круговой обмотки трансформатора на сборные шины выпрямителя. При этом переход с одной ступени регулирования на другую сопровождается изменением амплитуды пульсаций U_d , из-за чего при девиации управляющего импульса управления в окрестности точки перехода со ступени на ступень в выходном напряжении появляются низкочастотные гармоники. В настоящей работе предлагается модифицированный способ ступенчато-хордового управления, исключающий возбуждение низкочастотных гармоник при переходе с одной ступени регулирования на другую.

Ключевые слова: трансформатор с вращающимся магнитным полем, управляемый выпрямитель, способ управления, качество выпрямленного напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные управляемые выпрямители (УВ), выполненные на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями (ТВМП) [1, 2], как показано в [3], обеспечивают более высокую электромагнитную совместимость с питающей сетью и нагрузкой. Важную роль в этом играют ТВМП, выполненные на цилиндрических магнитопроводах, у которых за счет конструктивных мероприятий, подобных мероприятиям, применяемым в электрических машинах, обеспечиваются высокие показатели качества питающего и выходного напряжения [2 - 4].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Конструктивно силовая часть УВ с ТВМП (рис. 1) содержит полупроводниковый коммутатор и ТВМП, подключаемый к питающей сети через трехфазную обмотку, которая формирует в цилиндрическом магнитопроводе трансформатора вращающееся магнитное поле (ВМП).

Выходная круговая обмотка (КО) выполняется в виде замкнутой в многоугольник многосекционной обмотки, в секциях которой ВМП возбуждает пространственно сдвинутые ЭДС, при этом число секций КО определяет фазность преобразования (рис. 1). В силу общности принципов коммутации ключей, УВ с ТВМП могут управляться импульсно-фазовыми способами, разработанными для трехфазных мостовых выпрямителей [5].

При четном числе N -секций КО пара силовых ключей подключает на сборные шины выпрямителя диаметрально расположенные отводы секций КО (например, 5 и 10 на рис. 1) синфазно с вращающимся суммарным вектором магнитного поля ($\alpha=0^\circ$) или со сдвигом на угол $\alpha>0^\circ$. В этом случае в кривой выпрямлен-

ного напряжения (ВН) получается четное число N пульсаций ВН с периодом $T_{\Pi}=2\pi/N$ без разрывов в кривой выпрямленного напряжения U_d при $\alpha=0^\circ$ и с разрывами первого рода при $\alpha>0^\circ$.

При нечетном числе секций диаметрально расположенные отводы в КО отсутствуют, в результате силовые ключи коммутатора подключают на сборные шины те отводы, через которые можно условно провести наибольшие хорды. При этом в кривой ВН получается удвоенное число пульсаций – $2N$ с периодом $T_{\Pi}=\pi/N$, так как через каждый отвод можно условно провести две максимальные по величине хорды [6].

При увеличении глубины регулирования или угла управления α увеличивается амплитуда пульсаций выпрямленного напряжения (ВН), при этом коэффициент пульсаций ВН (K_{PV}) начинает быстро нелинейно возрастать, что следует из выражения:

$$\begin{aligned} K_{PV}(U_d) &= \frac{\Delta_{\max}(U_d)}{2U_d} \cdot 100\% = \\ &= \frac{U_{d\max} - U_{d\min}}{2U_d} \cdot 100\% = \\ &= \frac{1 - \cos\left(\frac{T_{\Pi}}{2}\right)}{2 \cdot T_{\Pi}^{-1} \cdot \int_{\frac{T_{\Pi}}{2}}^{\frac{T_{\Pi}}{2}} \cos(x) dx} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (1)$$

Анализ геометрической интерпретации структуры правильных многоугольников позволил установить, что многофазное векторное пространство электрических потенциалов в отводах КО позволяет сформировать ступени регулирования (СР) U_d , имеющие минимальное и одинаковое значение для всех K_{PV} при $\alpha=0^\circ$. Количество ступеней регулирования K_C , определяется

количеством хорд различной длины, которые условно можно провести в правильном N -угольнике – $K_C = [N/2]$. Так, при $N=10$ и при $N=11$ количество ступеней регулирования $K_C=5$.

Нормированное относительно единицы значение амплитуды выпрямленного напряжения, получаемого на k -й ступени, определяется по формулам:

$$E_k(N)|_{N-\text{четное}} = \cos\left(\frac{\pi(k-1)}{N}\right); \quad (2)$$

$$E_k(N)|_{N-\text{нечетное}} = \cos\left(\frac{\pi(2k-1)}{2N}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2N}\right)^{-1}. \quad (3)$$

Использование различных СР позволило разработать ступенчато-хордовый способ управления (СХСУ) (рис. 2) [7, 8], регулировочная характеристика которого, как показано в [8], является составной и кусочно-заданной для каждой СР.

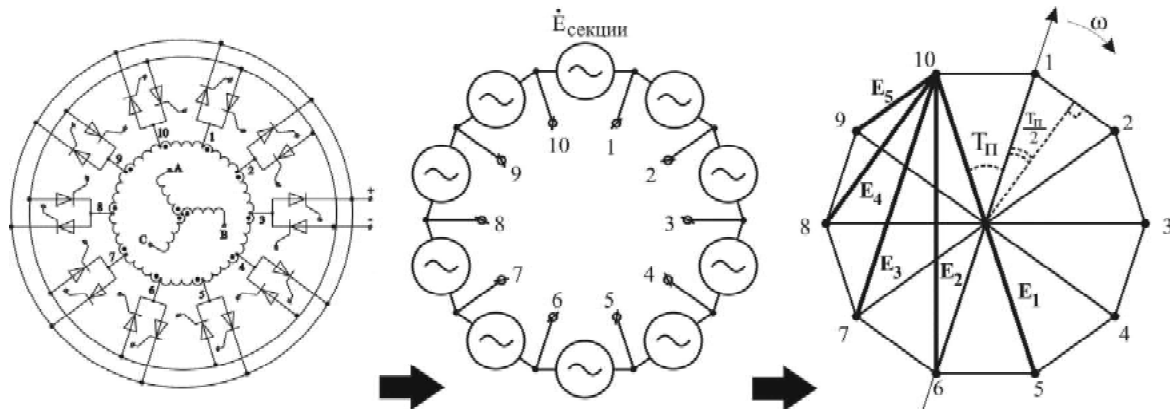


Рис. 1. Структурная схема УВ с ТВМП (а) и геометрические аналогии ТВМП (б-в)

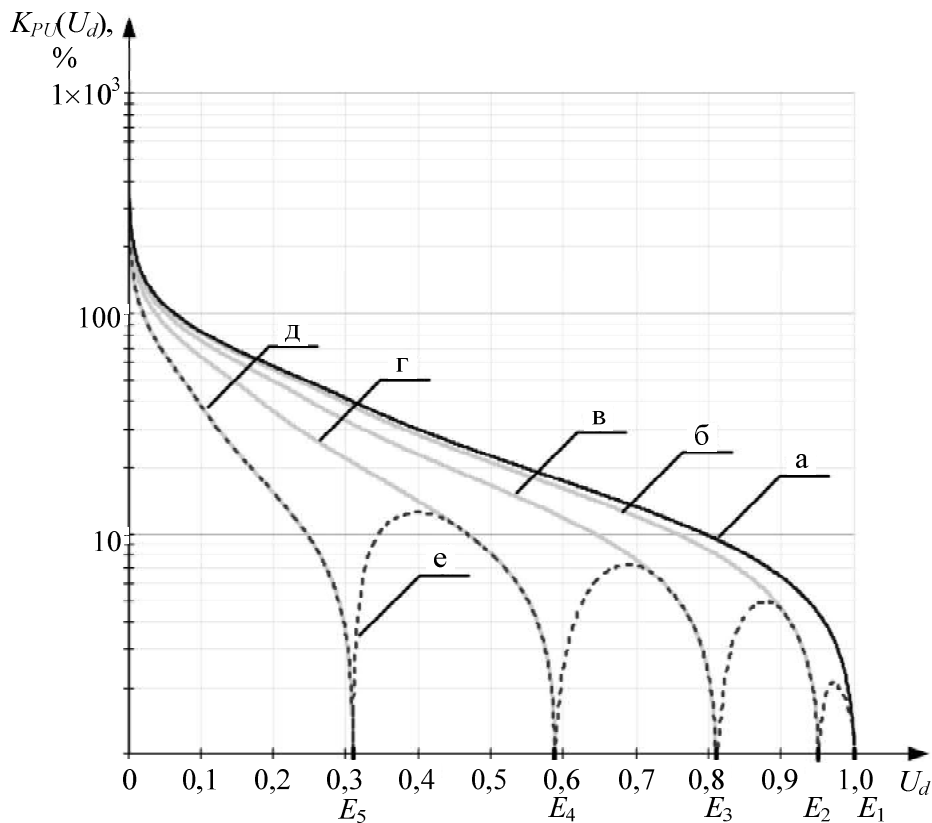


Рис. 2. Графики зависимостей $K_{PV}(U_d)$ для УВ с ТВМП с $N=10$: классический способ управления (а), СХСУ (б-д), комбинированный способ управления (е)

Основное преимущество СХСУ состоит в том, что для удержания K_{PU} в заданном диапазоне при увеличении глубины регулирования U_d , осуществляется переход с более высокой на более низкую СР, при этом K_{PU} снижается до минимального значения K_{PUmin} . Если угол управления α на меньшей ступени продолжает расти, то $K_{PU}(U_d)$ тоже возрастает, но с начального значения (рис. 2, б–д).

Переход с одной СР на другую, т.е. с E_1 на E_2 , с E_2 на E_3 и т.д., сопровождается резким изменением амплитуды пульсаций, что при девиации управляющего сигнала вблизи точки перехода может приводить к появлению в спектре выходного напряжения низкочастотных гармоник.

Для исключения появления низкочастотных гармоник предлагается **комбинированный способ** управления, в котором используются ЭДС смежных СР на одном интервале пульсации U_d , что позволяет осуществлять переход с одной СР на другую при изменении глубины регулирования с плавным снижением амплитуды пульсаций U_d до K_{PUmin} и последующем ее постепенным увеличением (рис. 2, е).

Алгоритмически это реализуется за счет изменения интегральной площади соответствующего сегмента регулирования с помощью изменения момента времени коммутационного перехода с $(k+1)$ -й СР на k -ю СР от максимального значения до нуля (или наоборот). Сегменты регулирования интерпретируются как площади фигур, сформированных на временной диаграмме всех мгновенных значений ЭДС КО ТВМП и получающихся путем ограничения по оси ординат смежными СР (т.е. теми, порядковый номер которых отличается на единицу). На рис. 3 приведены сегменты регулирования при $N=10$, а на рис. 4 – формы выходных напряжений при комбинированном способе управления УВ с ТВМП с $N=10$ при различной глубине регулирования.

На рис. 5 в качестве примера приведены регулировочные характеристики для всех поддиапазонов регу-

лирования для УВ с ТВМП с $N=10$, представляющие обобщенную регулировочную характеристику. Диапазон значений выходного напряжения определяется объединением диапазонов значений выходного напряжения для каждого диапазона регулирования:

$$U_d = [0; E_1] = U_d^1 \cup U_d^2 \cup \dots \cup U_d^k. \quad (4)$$

В формуле (4) объединяемые множества определяются

$$U_d^n = (E_n; E_{n+1}]. \quad (5)$$

На рис. 6 приведены графические зависимости $K_{PU}(U_d)$ при нечетном числе секций КО ($N=9; 11; 13$). Из сравнения их с зависимостями $K_{PU}(U_d)$, при $N=10$, представленными на рис. 2, е, следует, что применение комбинированного способа управления позволяет получить более высокое качество выходного напряжения при глубоком его регулировании $U_d \in [0; 0,9U_{dmax}]$ в обоих случаях.

Если учесть, что ГОСТ 32144-2013 [9] требует ограничивать значение K_{PU} на уровне 10%, то из сравнения классического и комбинированного способов управления УВ с ТВМП на основе анализа рис. 2 и 6 следует, что без применения дополнительных мероприятий, при классическом способе и глубоком регулировании U_d , 10 % порог K_{PU} , при $N=10$ будет превышен при 20 % глубине регулирования U_d , а при нечетных $N=9, 11, 13$ допустимый 10 % порог K_{PU} будет превышен, когда U_d снизится соответственно до 60, 50 и 44 % от своего максимального значения.

При комбинированном способе управления УВ с ТВМП и глубоком регулировании U_d , 10 % порог K_{PU} , при $N=10$ будет превышен, когда U_d снизится до 46 % от своего максимального значения – U_{dmax} , а при $N=9$ допустимый 10 % порог K_{PU} будет превышен, когда U_d снизится до 20 % от U_{dmax} .

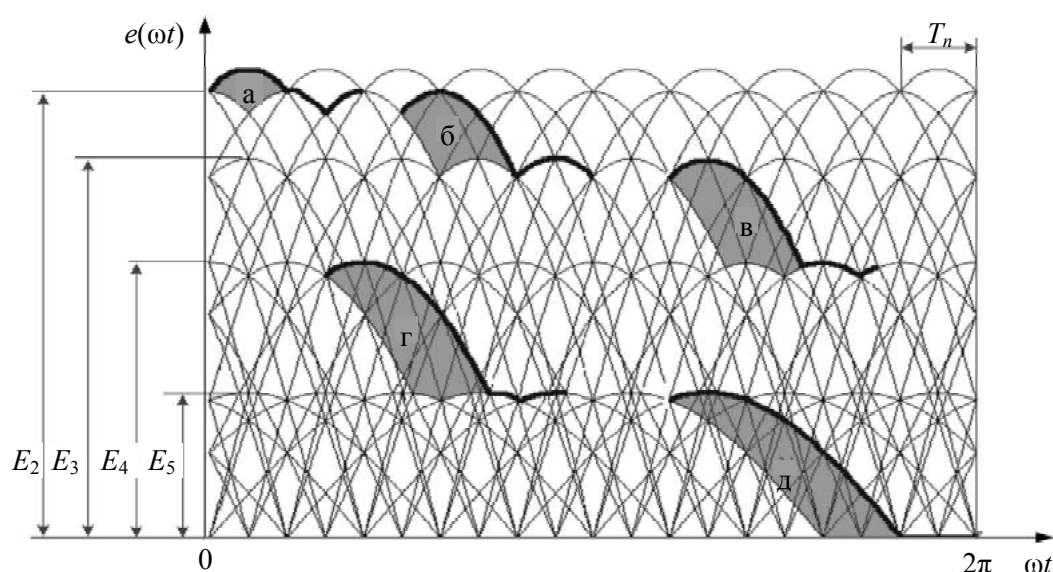


Рис. 3. Формирование сегментов регулирования в пространстве ЭДС для УВ с ТВМП с $N=10$ при комбинированном способе управления:

а – первый; б – второй; в – третий; г – четвертый; д – пятый сегменты регулирования

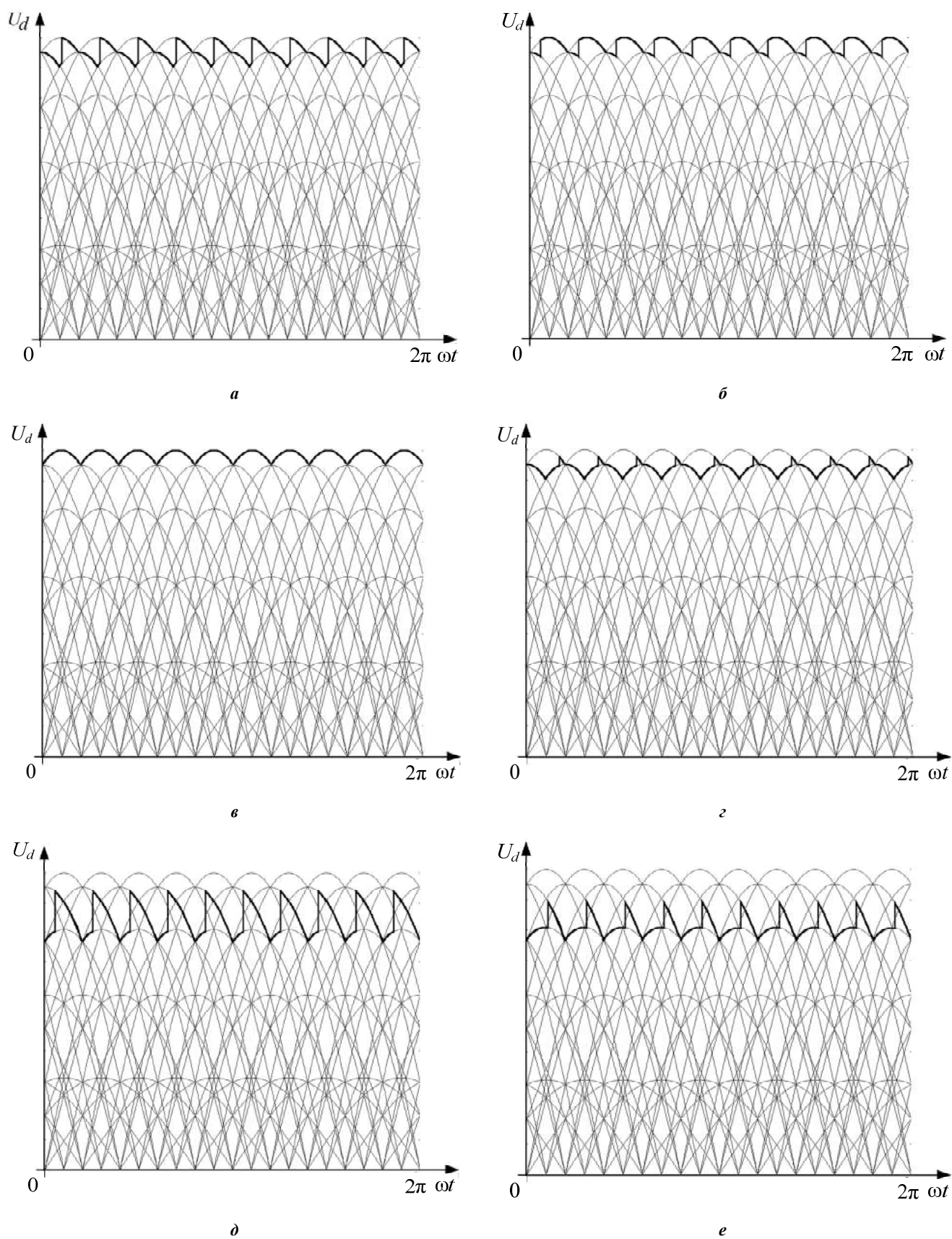


Рис. 4. Форма выходных напряжений при комбинированном способе управления УВ с ТВМП с $N=10$ при различной глубине регулирования

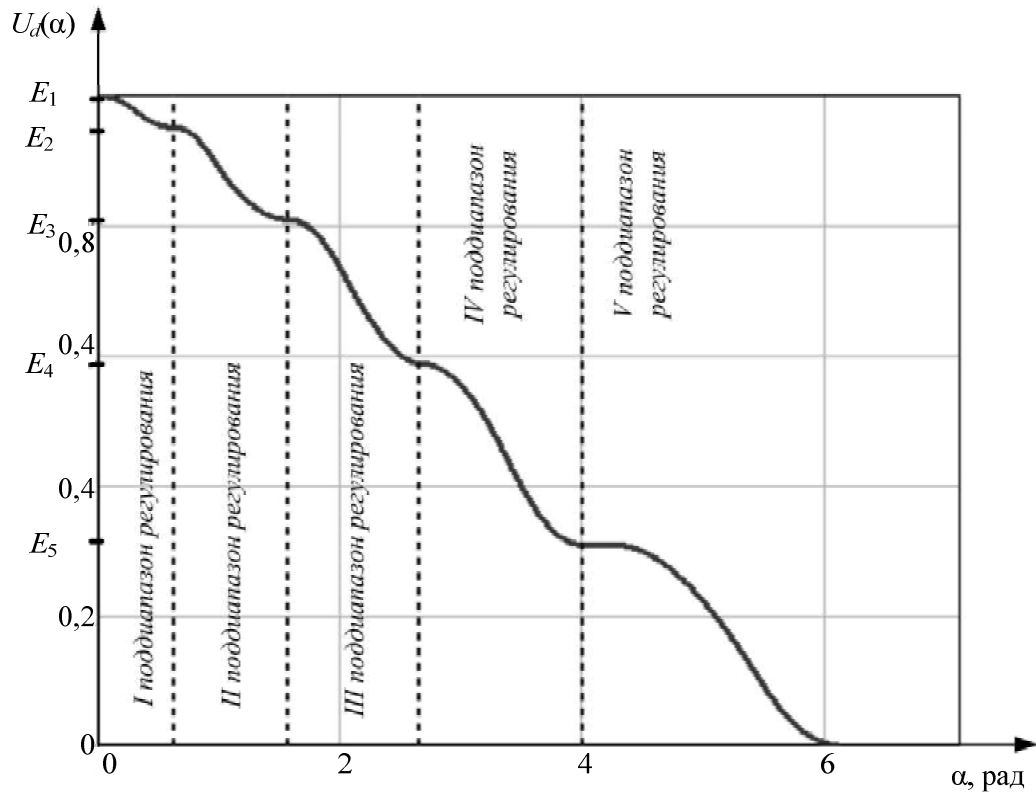


Рис. 5. Обобщенная регулировочная характеристика для УВ с $N=10$ и комбинированного способа управления

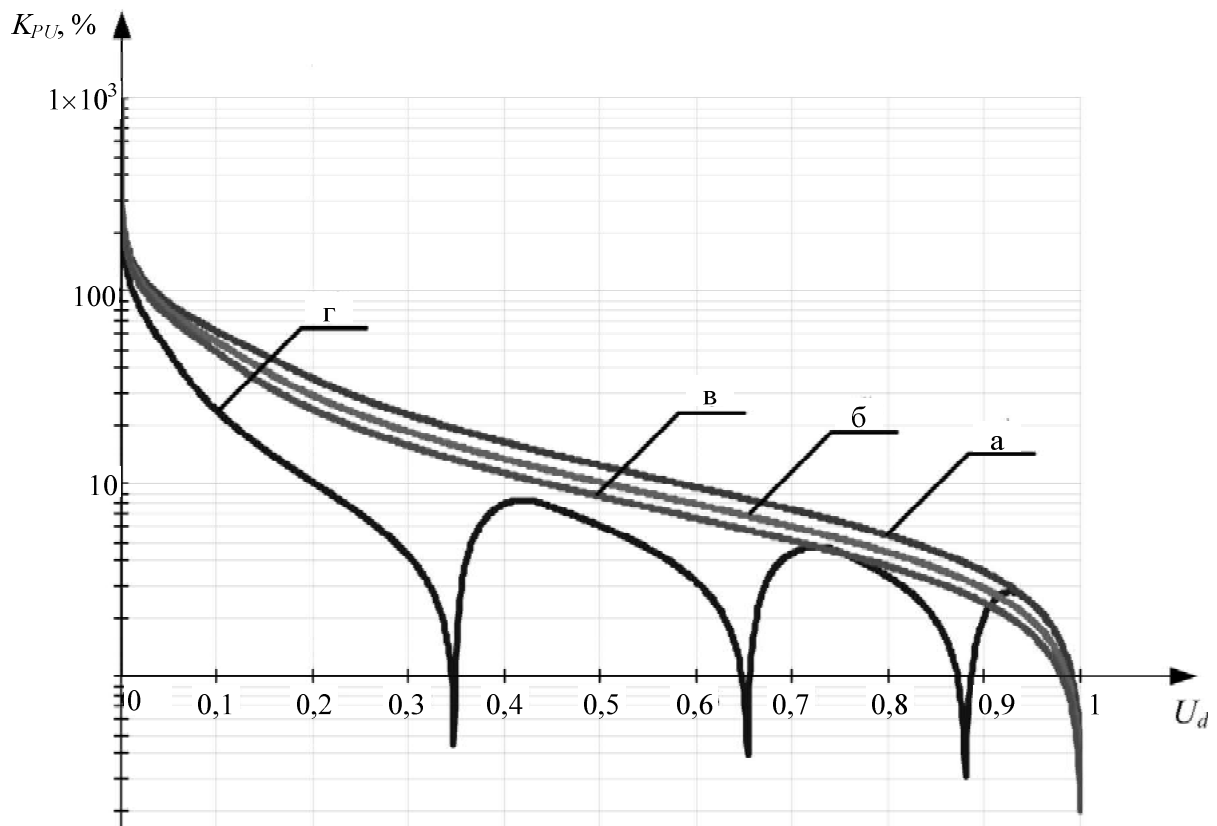


Рис. 6. График зависимости $K_{PU}(U_d)$ при классическом способе управления для УВ с ТВМП с $N=9$ (а), для УВ с ТВМП с $N=11$ (б), для УВ с ТВМП с $N=13$ (в) и для УВ с ТВМП с $N=9$ при комбинированном способе управления (г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Комбинированный способ управления позволяет улучшить качество выходного напряжения по сравнению с классическим и ступенчато-хордовым способами управления, обеспечить лучшую электромагнитную совместимость с питающей сетью за счет снижения амплитуды коммутационных искажений и решить проблему низкочастотных гармоник при переходе с одной ступени регулирования на другую.

2. Применение комбинированного способа управления на примере рассмотрения УВ с ТВМП с $N=9$ и $N=10$ секциям круговой обмотки показывает, что глубина регулирования выходного напряжения при $K_{PU} \leq 10$ % больше на 40 %, чем при классическом способе управления, и на 20 % больше, чем при ступенчато-хордовом способе управления.

3. Алгоритмическая реализация комбинированного способа управления ввиду составного характера регулировочной характеристики сложнее, чем у классического способа, но сопоставима по сложности со ступенчато-хордовым способом управления, следовательно, целесообразность применения комбинированного способа оправдана в задачах, связанных с обеспечением высокого качества выпрямленного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пат. 2534218 Российская Федерация, МПК Н 01 F 30/14. Многофазный трансформатор / Сеньков А. А., Сеньков А. П., Калмыков А. Н.; заявитель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». № 2013131331/07; заявл. 08.07.2013; опубл. 27.11.13.
- Григораш О.В., Отмахов Г.С. Выпрямители на трансформаторах с вращающимся магнитным полем // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 98. С. 560–570.
- Черевко А.И. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и электрооборудования в автономных электроэнергетических установках: монография / Севмашвтуз. Северодвинск, 2005.
- Лимонникова Е. В. Математическое и физическое моделирование полупроводниковых выпрямителей на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем в судовых электротехнических комплексах: дис... канд. техн. наук. 05.09.03 / Лимонникова Елена Владимировна. Северодвинск, 2007.
- Писарев А.Л., Деткин Л.П. Управление тиристорными преобразователями (системы импульсно-фазового управления). М.: «Энергия», 1975.
- Музыка М. М. Совершенствование полупроводниковых преобразователей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями в судовых электротехнических системах: дис... канд. техн. наук. 05.09.03 / Музыка Михаил Михайлович. Северодвинск, 2008.
- Пат. 2566365 Российская Федерация, МПК Н 02 М 7/12. Способ ступенчато-хордового регулирования выходного напряжения выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / Платоненков С. В., Черевко А. И., Рогушина А. А., Сакович И. А., Музыка М. М., Кузьмин И. Ю.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова» (САФУ). № 2014123573/07; заявл. 09.06.14; опубл. 27.10.15, Бюл. № 30. – 11 с.: ил.
- Сакович И.А., Черевко А.И., Платоненков С.В. Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем // Электричество 2016. №1. С. 43–49.
- ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Поступила в редакцию 08 октября 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMBINED CONTROL METHOD OF THE RECTIFIER BASED ON A TRANSFORMER WITH ROTATING MAGNETIC FIELD

Igor A. Sakovich

Team Manager, the department of development and implementation of Information Technology, the JSC “Bius”, Severodvinsk, Russia. E-mail: igorsakovitch@gmail.com.

Aleksander I. Cherevko

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of Ship Electric Power Supply and Electrical Engineering Department, the North (Arctic) Federal University (NFU), Severodvinsk, Russia. E-mail: cherevko-ai@mail.ru.

Sergey V. Platonenkov

Assistant Professor, the Department of Industrial Automation and Control, the North (Arctic) Federal University (NFU), Severodvinsk, Russia. E-mail: platonenkov@mail.ru.

Abstract. Controlled rectifiers of three-phase voltage based on a transformer with a rotating magnetic field where secondary N-sections winding represents N-phase shape like circular winding and semiconductor commutator can be represented by a full bridge scheme. That is why these rectifiers may be controlled by the pulse-phase methods developed for the three-phase bridge rectifiers. One of the new control methods is the step-chord method that will improve the quality of the output

voltage and electromagnetic compatibility with the power supply network in comparison with classical control methods. Regulation of rectified voltage U_d while using this method consists in commutative control of the power switches of the commutator various number of the transformer circular winding sections to rectifier common buses. In the process, the step-to-step crossing is accompanied by an U_d -amplitude pulsation change, that causes signal deviation of the control system in these

change-point environment, which causes occurrence of low frequency components in the output voltage. The modified step-chord control method, which eliminates the generating of low frequency harmonics by step-to-step crossing is proposed in this article.

Keywords: Transformer with rotating magnetic field, controlled rectifier, control method, quality of rectified voltage.

REFERENCES

1. Senkov, A. A., Senkov A. P., Kalmykov A.N. *Mnogofaznyj transformator* [Polyphase transformer]. Patent RF, no. 2534218, 2013.
2. Grigorash O.V., Otmahov G.S. Rectifier on transformers with rotating magnetic field. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2014, no. 98, pp. 560–570. (In Russian)
3. Cherevko A.I. *Elektromagnitnaya sovместimost poluprovodnikovyh preobrazovatelej i elektrooborudovaniya v avtonomnyh elektroenergeticheskikh ustanovkah* [Electromagnetic compatibility of semiconductor convertors and autonomy electrical equipment: monograph]. Severodvinsk, Sevmashvtuz Publ., 2005.
4. Limonnikova E.V. *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie poluprovodnikovih vipryamitelei na baze transformatora s vraschayuschimsya magnitnim polem v sudovih elektrotehnicheskikh kompleksah*. Kand. Diss. [Mathematical and physical modeling of semiconductor rectifiers based on transformers with rotating magnetic in marine electric power systems. Ph.D. Diss.]. Severodvinsk, 2007.
5. Pisarev A.L., Detkin L.P. *Upravleniye tiristornymi preobrazovateljami* [Control of the thyristor converters]. Moscow, Energy Publ., 1975.
6. Muzyka M.M. *Sovershenstvovanie poluprovodnikovih preobrazovatelei s transformatorami s vraschayuschimsya magnitnimi polyami v sudovih elektrotehnicheskikh sistemah*. Kand. Diss. [Improvement of semiconductor converters based on transformers with rotating magnetic fields in the marine electrical systems. Ph.D. Diss.]. Severodvinsk, 2008.
7. Platonenkov S.V., Cherevko A.I. et al. *Sposob stupenchatohodovogo regulirovaniya vyhodnogo napryazheniya vipryamatelya na baze transformatora s vraschayushchimsya magnitnym polem* [Step-chord control method of output voltage of the rectifier based on a transformer with rotating magnetic field]. Patent RF, no. 2014123573/07, 2015.
8. Sakovich I.A., Cherevko A.I., Platonenkov S.V. *Kachestvo vyhodnogo napryazheniya upravlyаемого vipryamatelya na baze transformatora s vraschayushchimsya magnitnym polem* [Output voltage quality of the controlled rectifier based on a transformer with rotating magnetic field]. *Electrotehnika* [Electrical Technology Russia], 2016, no. 1 (2016), pp. 43–49. (In Russian)
9. State Standard 32144-2013 Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems.

Сакович И.А., Черевко А.И., Платоненков С.В. Комбинированный способ управления выпрямителем, построенным на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 17 - 23. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-17-23

Sakovich I.A., Cherevko A.I., Platonenkov S.V. Combined Control Method of the Rectifier Based on a Transformer With Rotating Magnetic Field. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 17-23. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-17-23