

* * *

Электричество, 2016, № 1, с. 43–49.

Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем

САКОВИЧ И.А., ЧЕРЕВКО А.И., ПЛАТОНЕНКОВ С.В.

Приводятся результаты исследования классического и нового ступенчато-хордового импульсно-фазовых способов управления выпрямителем, построенным на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем. Изложен анализ геометрической аналогии круговой обмотки с десятью секциями и геометрическая интерпретация понятия ступеней регулирования, а также объяснен принцип реализации ступенчато-хордового способа управления. Приводятся аналитические выражения для расчета последовательности коммутации силовых ключей для классического и ступенчато-хордовых способов управления, позволяющие выполнить их реализацию для различного числа секций круговой обмотки. Применение ступенчато-хордового способа управления позволяет начиная со второй ступени регулирования существенно улучшить качество выпрямленного напряжения по сравнению с классическим импульсно-фазовым способом, удастся расширить диапазон регулирования при заданном качестве выходного напряжения в 1,5–2 раза. Реализация ступенчато-хордового способа управления возможна при использовании как полностью, так и неполностью управляемых силовых ключей. Применение неполностью управляемых силовых ключей накладывает ограничения на реализацию ступенчато-хордового алгоритма управления, что отражается на регулировочной характеристике и зависимости коэффициента пульсаций по напряжению от среднеквадратического значения выпрямленного напряжения. Качество выпрямленного напряжения по сравнению с использованием полностью управляемых силовых ключей оказывается ниже как при четном, так и при нечетном числе секций круговой обмотки или числе пар силовых ключей, диапазон регулирования выпрямленного напряжения сокращается на 10–12% для случая, когда уровень коэффициентов пульсации не превышает 10%.

Ключевые слова: выпрямитель, трансформатор с вращающимся магнитным полем, многофазные преобразователи, качество выпрямленного напряжения, способ управления, ступени регулирования, ступенчато-хордовый способ управления

Известно [1], что в трансформаторе с вращающимся магнитным полем (ТВМП) создается многофазное пространство ЭДС во вторичной круговой обмотке (КО). Это предоставляет широкие воз-

можности для построения на его основе преобразователей электрической энергии с высоким качеством выходного напряжения и тока, в том числе управляемых выпрямителей (УВ). Одной из задач,

подлежащих решению при проектировании выпрямителей с ТВМП и их системы автоматического управления (САУ), являются, в частности, оценка качества и расчет выходного напряжения и регулировочной характеристики, которые определяются не только конструктивными особенностями силового коммутатора и ТВМП, но и реализуемыми способами управления силовыми ключами (СКл), а также диапазоном их управляемости.

В [1–3] для управления УВ на базе ТВМП было предложено использовать импульсно-фазовый способ, при котором СКл коммутируют отводы круговой обмотки ТВМП со сдвигом на угол α от момента времени условной естественной коммутации неуправляемых вентилей. Такой способ управления применительно к УВ на базе ТВМП с мостовым коммутатором является классическим [5]. При этом качество выходного напряжения УВ напрямую зависит от числа пар СКл силового коммутатора [1, 2], что, в свою очередь, обусловлено числом секций КО ТВМП [3, 4].

Анализ геометрической аналогии КО ТВМП [4] (рис. 1) представил возможность разработки нового импульсно-фазового способа управления, который можно назвать ступенчато-хордовым (СХ). При СХ способе управления коммутатор подключает на сборные шины УВ только те отводы КО, между которыми можно условно-параллельно провести пары хорд (рис. 1), что позволяет повысить качество выходного напряжения на большей части диапазона регулирования и улучшить регулировочную характеристику УВ (рис. 2,б). Это возможно благодаря тому, что коэффициент пульсаций по напряжению K_{pU} на каждой ступени регулирования ста-

новится одинаковым, так как размах пульсаций D_{max} и среднеквадратичное значение (СКЗ) выпрямленного напряжения U_d изменятся в одинаковой пропорции (рис. 3), и в соответствии с [5] приближенно может быть определен по формуле

$$k_{pU}(U_d) = \frac{D_{max}}{2U_d} 100\% = \frac{1 - \cos\left(\frac{\alpha T_{\Pi}}{2} \frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)}{2 \frac{T_{\Pi}^{-1}}{2} \frac{T_{\Pi}/2}{\dot{\omega} \cos(x) dx}} 100\%. \quad (1)$$

Период пульсации выпрямленного напряжения T_{Π} в (1) определяется для ТВМП с четным числом N секций КО и с нечетным КО:

$$T_{\Pi}(N) \Big|_{N - \text{етн.}} = 2p / T; \quad (2.1)$$

$$T_{\Pi}(N) \Big|_{N - \text{не етн.}} = p / T. \quad (2.2)$$

Тогда выражение (1) можно представить для двух случаев:

$$K_{pU}(N) \Big|_{N - \text{етн.}} = \frac{p \sin\left(\frac{\alpha p \dot{\omega}}{2 N \omega}\right)}{N \sin\left(\frac{\alpha p \dot{\omega}}{2 N \omega}\right)} 100\%; \quad (3.1)$$

$$K_{pU}(N) \Big|_{N - \text{не етн.}} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha p \dot{\omega}}{4 N \omega}\right)}{2 N \sin\left(\frac{\alpha p \dot{\omega}}{2 N \omega}\right)} 100\%. \quad (3.2)$$

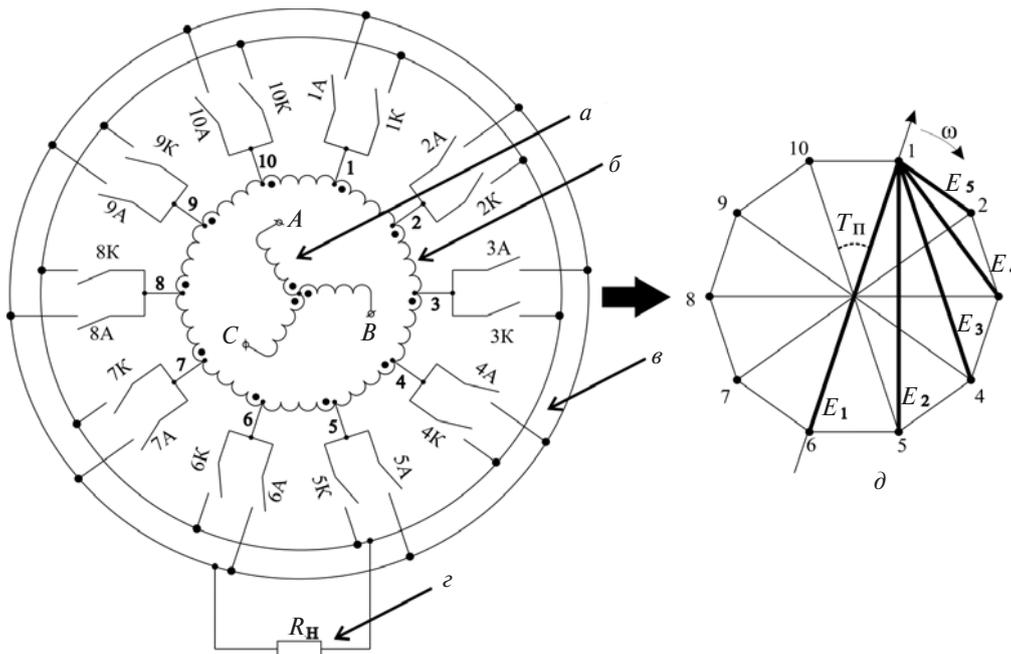


Рис. 1. Структурная схема УВ с ТВМП с трехфазной (а) и круговой (N = 10) (б) обмотками, сборными шинами (в) и нагрузкой (z); справа (д) – геометрическая аналогия КО с обозначением хорд различных ступеней регулирования

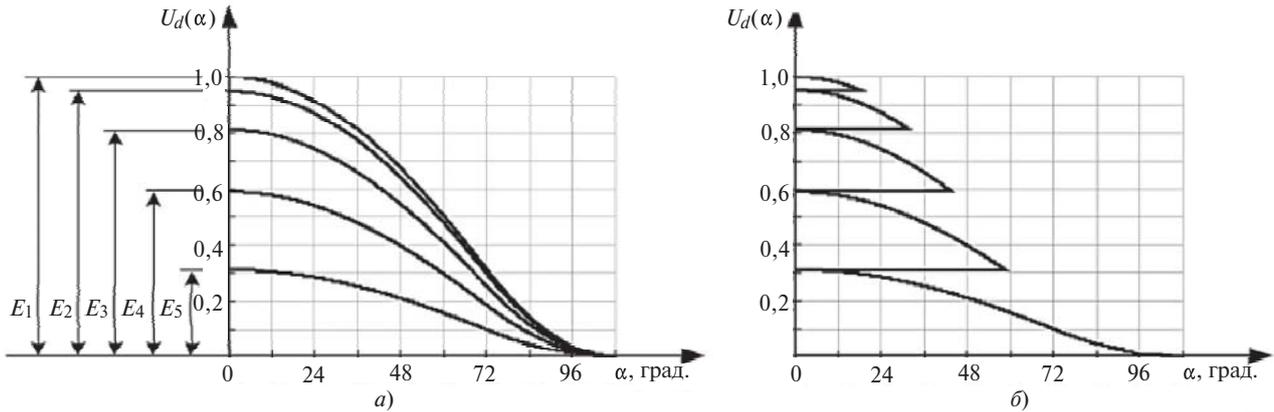


Рис. 2. Регулировочные характеристики для УВ с ТВМП при $N = 10$ для каждой ступени регулирования (а) и результирующая кусочно-заданная (б) для СХ способа управления с использованием полностью управляемых СКЛ

Зависимость коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения от его СКЗ для k -й ступени регулирования:

$$K_{pU}(U_d, k) = K_{pU}(E_k, U_d, 0); \quad (4)$$

$$k \hat{=} [1; K_c];$$

$$k \hat{=} N.$$

В формуле (4) максимальное значение выпрямленного напряжения E_k , получаемое на k -й ступени регулирования (рис. 1 и 3), определяется по формулам:

$$E_k(N) \Big|_{N- \text{ этн.}} = \cos \frac{\arccos(k-1) \frac{\delta}{\delta}}{N} \quad (5.1)$$

$$E_k(N) \Big|_{N- \text{ не этн.}} = \cos \frac{\arccos(2k-1) \frac{\delta}{\delta}}{2N} \quad (5.2)$$

Число ступеней регулирования K_c различно для УВ на базе ТВМП с четным и нечетным числами секций КО и определяется из выражения:

$$K_c(N) = \frac{e N \dot{u}}{e \frac{N}{2} \dot{u}} \quad (6)$$

Из (4) следует, что регулировочные характеристики для каждой ступени подобны друг другу, а значит, и регулировочной характеристике для классического способа управления (рис. 2).

Применение формулы

$$K_{pU} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{FFT}/2} \dot{a} |\text{spectr}_1|^2}}{|\text{spectr}_0|} \cdot 100\% \quad (7)$$

для расчета значения K_{pU} [5] на основе учета спектральных составляющих напряжения позволяет построить кусочно-заданную на всем диапазоне регулирования выходного напряжения зависимость $K_{pU}(U_d, k)$, оптимизированную тем самым с целью улучшения качества выходного напряжения (рис. 4).

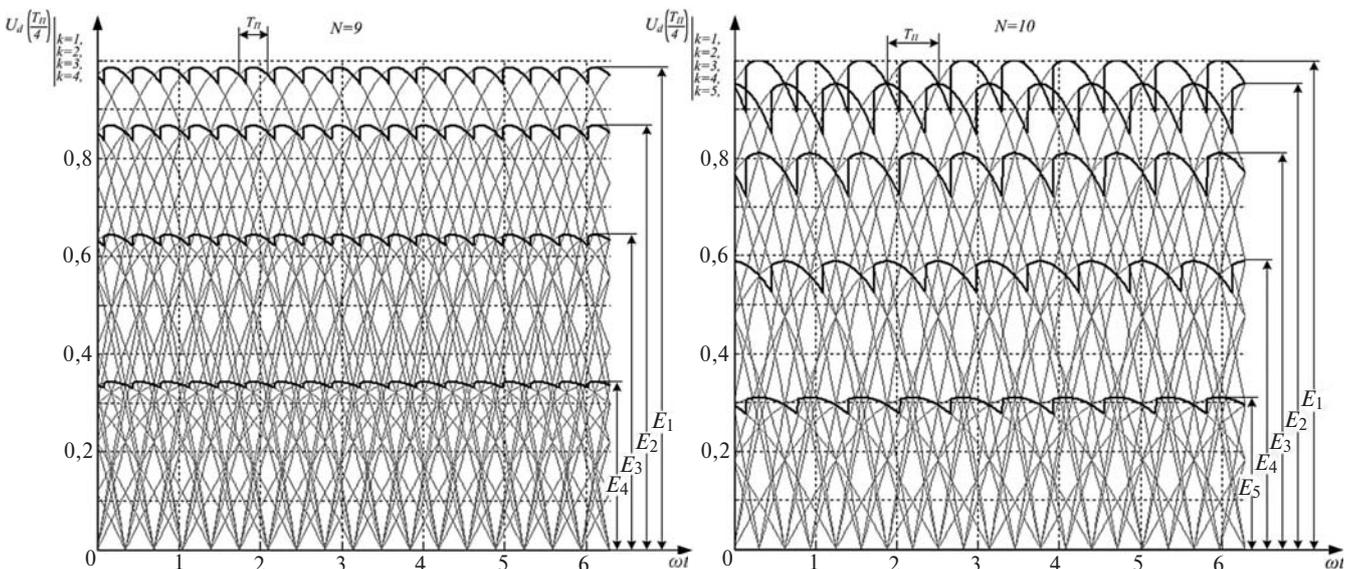


Рис. 3. Форма выходного напряжения УВ с ТВМП при $N = 9$ и 10 на различных ступенях регулирования

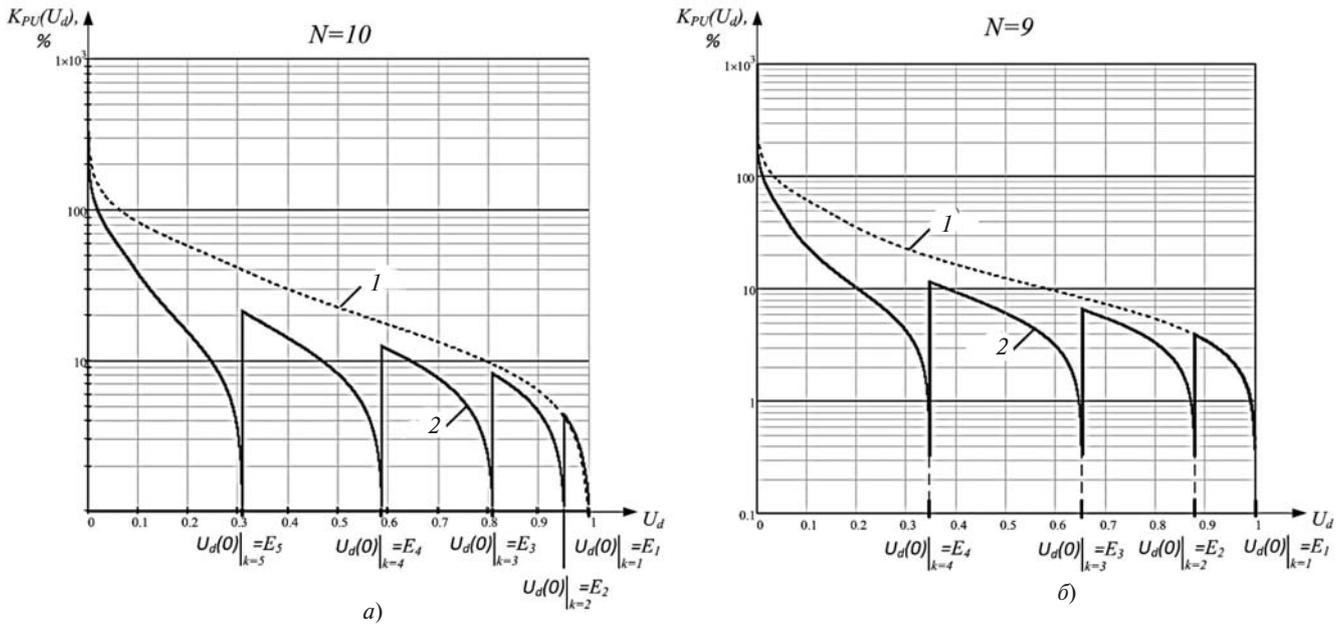


Рис. 4. Графики зависимостей коэффициента пульсаций выходного напряжения от его СКЗ для УВ с ТВМП при $N = 10$ (а) и $N = 9$ (б) для классического (1) и ступенчато-хордового (2) способов управления при использовании полностью управляемых СКЛ

Из анализа выходного напряжения УВ с ТВМП (рис. 3) следует, что при регулировке U_d на отдельных ступенях в кривых выходного напряжения появляются разрывы первого рода, что ведет к увеличению гармоник и, следовательно, коэффициента пульсаций K_{pU} .

Однако применение ступенчато-хордово-фазового управления (рис. 4, кривые 1) как при четном, так и при нечетном числе пар СКЛ расширяет в 1,5–2 раза диапазон регулирования выпрямленного напряжения, при котором коэффициент K_{pU} не превышает некоторого заданного значения, например 10%-й уровень. Так, при 9 парах СКЛ и классическом способе регулирования значение K_{pU} превышает 10%-й порог при снижении U_{da} до 60% номинального значения, а при ступенчато-хордовом регулировании – при снижении U_{da} до 38% $U_{dном}$; при 10 парах СКЛ и классическом способе регулирования – при снижении U_{da} до 80% $U_{dном}$, а при ступенчато-хордовом – при снижении U_{da} до 65% $U_{dном}$.

Для того чтобы спроектировать и изготовить регулятор САУ, а также построить математические модели УВ с ТВМП, необходимые для исследования динамических и аварийных режимов работы УВ с ТВМП, требуется разработать алгоритмы управления силовыми ключами при различных способах управления, которые формализуются очередностью коммутации СКЛ силового коммутатора УВ.

Силовым ключам анодной и катодной групп присваиваются порядковые номера согласно отводам круговой обмотки ТВМП, к которым они подключены (рис. 1). Один из отводов принимается за базовый, ему присваивается номер «1». Отвод КО, электрический потенциал которого имеет мини-

мальный по модулю отрицательный фазовый сдвиг относительно рассматриваемого отвода, получает следующий за ним порядковый номер.

Очередность коммутации СКЛ определяется в соответствии с выражениями для четного и нечетного N :

для классического способа управления

$$\begin{cases} A(N, n) = 1 + \text{mod}(n, N); \\ K(N, n) = 1 + \text{mod}\left(\frac{N}{2}n - 1 + \frac{N}{2}, \frac{N}{2}\right); \\ N, n \in N; \end{cases} \quad (8.1)$$

$$\begin{cases} A(N, n) = 1 + \text{mod}\left(\frac{n+1}{2}, \frac{N}{2}\right); \\ K(N, n) = 1 + \text{mod}\left(\frac{n+1}{2} + \frac{n}{2}, \frac{N}{2}\right); \\ N, n \in N. \end{cases} \quad (8.2)$$

для ступенчато-хордового

$$\begin{cases} A(N, n) = 1 + \text{mod}((n-1), N); \\ K(N, n, k) = 1 + \text{mod}\left(\frac{N}{2} - k + n, \frac{N}{2}\right); \\ k \in [1, K_c]; N, n, k \in N; \end{cases} \quad (9.1)$$

$$\begin{cases} A(N, n, k) = 1 + \text{mod}\left(\frac{n-1}{2} - k + 1 + N + (k-1)\text{mod}(n, 2), N\right); \\ K(N, n, k) = 1 + \text{mod}\left(\frac{N+1}{2} - k + \frac{n}{2}, N\right); \\ k \in [1, K_c]; N, n, k \in N. \end{cases} \quad (9.2)$$

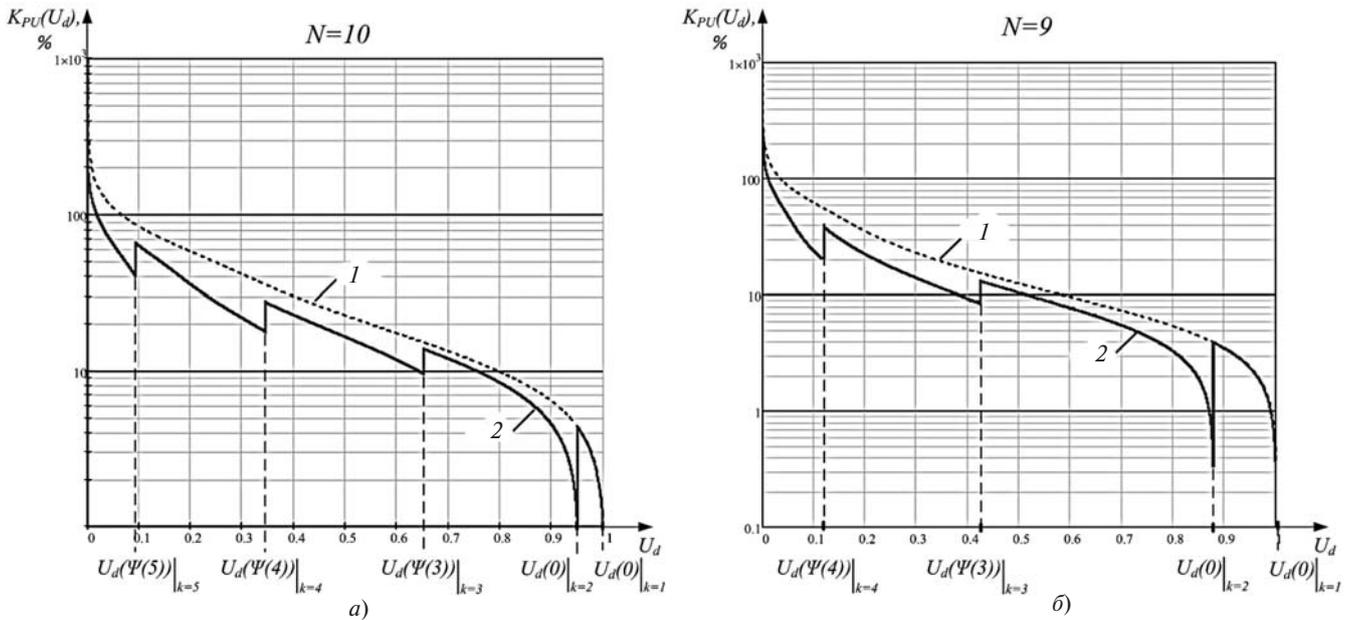


Рис. 5. Зависимости коэффициента пульсаций выходного напряжения от его СКЗ для УВ с ТВМП при $N = 10$ (а) и $N = 9$ (б) для классического (1) и ступенчато-хордового (2) способов управления при использовании неполностью управляемых СКЛ

Если классический способ управления может быть применен с использованием неполностью управляемых СКЛ, например однооперационных тиристоров, то реализация ступенчато-хордового способа управления на их базе имеет некоторые ограничения, которые необходимо учитывать в процессе проектирования УВ с ТВМП и его САУ.

В [6, 7] рассмотрены алгоритмические особенности управления УВ с ТВМП с использованием неполностью управляемых СКЛ. На основании анализа геометрической аналогии КО ТВМП сделан вывод о том, что импульсно-фазовое управление с использованием неполностью управляемых СКЛ для k -й ступени регулирования в диапазоне значений $a(k) \in [0; \gamma(k)]$ неосуществимо. Причина этого – не предусмотренное алгоритмом управление изменения формы выходного напряжения УВ, обусловленное переходом на ступень регулирования $k=1$ для УВ с ТВМП при четном числе секций КО и $k=2$ для УВ с ТВМП при нечетном числе секций КО.

Определение углового расстояния $\gamma(k)$ для k -й ступени регулирования УВ с ТВМП при четном и нечетном числа пар силовых ключей или секций КО отражают формулы:

$$\left. \begin{aligned} & \dot{\gamma}(k) \Big|_{N-\text{ четн.}} = (k-1) \frac{T_{\Pi}}{2}; \\ & \dot{\gamma}(k) \Big|_{k \in [3; K_c]; k \hat{=} N; \end{aligned} \right\} \quad (10.1)$$

$$\left. \begin{aligned} & \dot{\gamma}(k) \Big|_{N-\text{ не четн.}} = \frac{\pi}{2} k - \frac{1}{2} \frac{\ddot{\gamma}}{\omega}; \\ & \dot{\gamma}(k) \Big|_{k \in [2; K_c]; k \hat{=} N. \end{aligned} \right\} \quad (10.2)$$

Формулы (10.1) и (10.2) применительно к ступенчато-хордовому способу управления не только подтверждают его реализуемость с использованием неполностью управляемых СКЛ, но и позволяет уточнить оценку качества выходного напряжения УВ с ТВМП как для четного, так и для нечетного числа секций в его КО (рис. 5). Из анализа зависимостей $K_{pU}(U_d)$ на рис. 5 видно, что при ступенчато-хордовом способе управления использование неполностью управляемых СКЛ на первой и второй ступенях регулирования обеспечивает такую же управляемость УВ, что и применение полностью управляемых. А каждый последующий переход на ступень более высокого по нумерации порядка осуществляется в соответствии с (10.1) и (10.2), что видоизменяет результирующую характеристику $K_{pU}(U_d)$.

При применении неполностью управляемых силовых ключей качество выпрямленного напряжения оказывается ниже, чем при использовании полностью управляемых СКЛ, как при четном, так и при нечетном числе секций КО или числе пар силовых ключей. Так, для приведенного выше примера при 10 и 9 парах СКЛ, соответственно, диапазон регулирования выпрямленного напряжения сокращается на 10–12% для случая, когда K_{pU} не превышает 10%-й уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Червко А.И., Музыка М.М., Лимонникова Е.В. Влияние силовых схем коммутаторов на качество выходного напряжения управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями. – Электротехника, 2008, № 10, с. 22–28.

2. Музыка М.М., Черевко А.И., Платоненков С.В. Алгоритмы работы силовых ключей в составе коммутаторов управляемых выпрямителей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями. Инновационное развитие северных территорий России: образование, наука, производство. — Сборник докладов на научно-практических конференциях, Северодвинск, 2010, с. 106–113.

3. Черевко А.И., Базанов В.А., Музыка М.М. Системы управления полупроводниковыми преобразователями, выполненными на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями/Под. ред. А.И. Черевко. — Северодвинск, Севмашвуз, 2005, 92 с.

4. Черевко А.И., Музыка М.М., Платоненков С.В., Сакович И.А., Кузьмин И.Ю. Качество выходного напряжения выпрямителя, построенного на базе ТВМП, при чётном и нечётном числе секций КО ТВМП. — Электротехника, 2012, № 4, с. 41–45.

5. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007, с. 217.

6. Сакович И.А. Особенности коммутации неполностью управляемых силовых ключей управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем с четным числом секций круговой обмотки. — В сб.: Современная наука: теоретический и практический взгляд, ч. 2.4. — Уфа: Башкирский государственный университет, 2013, 143 с.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 1, pp. 43–49.

7. Сакович И.А. Особенности коммутации неполностью управляемых силовых ключей управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем с нечетным числом секций круговой обмотки. — В сб.: Актуальные проблемы современной науки. — Уфа: Башкирский государственный университет, Декабрь 2013, 239 с.

[05.10.15]

А в т о р ы : Сакович Игорь Александрович окончил филиал Санкт-Петербургского государственного морского технического университета в 2009 г. (г. Северодвинск). Руководитель группы информационных технологий ЗАО «Биус», преподаватель филиала Северного (Арктического) федерального университета (СФУ) в Северодвинске.

Черевко Александр Иванович окончил Ленинградский кораблестроительный институт в 1971 г. Докторскую диссертацию защитил в Санкт-Петербургском морском техническом университете в 2006 г. Заведующий кафедрой филиала СФУ в Северодвинске.

Платоненков Сергей Владимирович окончил филиал Санкт-Петербургского государственного морского технического университета в г. Северодвинске в 2006 г. Старший преподаватель филиала СФУ в Северодвинске.

Output Voltage Quality of a Controlled Rectifier Made Using a Transformer with Rotating Magnetic Field

SAKOVICH Igor' Aleksandrovich (Branch of the North (Arctic) Federal University (NFU), Severodvinsk, Russia) — Lecturer

CHEREVKO Aleksandr Ivanovich (Branch of the NFU, Severodvinsk Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

PLATONENKOV Sergei Vladimirovich (Branch of the NFU, Severodvinsk, Russia) — Senior Lecturer

The article presents the results from studying the classic and a new step-chord pulse-phase methods for control of a rectifier made using a transformer with rotating magnetic field. The geometrical analogy of a circular winding containing ten sections is analyzed; geometrical interpretation of the notion of control stages is given, and the principle of implementing the step-chord control method is explained. Analytic expressions for calculating the switching sequence of power switches are given for the classic and the step-chord control methods, using which these methods can be implemented for different numbers of circular winding sections. Application of the step-chord control method makes it possible, starting from the second control stage, to obtain essentially better quality of the rectified voltage as compared with that obtained using the classic pulse-phase method; in addition, it becomes possible to widen the adjustment range for the preset quality of output voltage by a factor of 1.5–2.0. The step-chord control method can be implemented using both fully and partially controlled power switches. The use of partially controlled power switches imposes certain limitations on implementing the step-chord control algorithm, which has an effect on the adjustment characteristic and on the dependence of voltage ripple ratio on the RMS value of rectified voltage. The quality of rectified voltage as compared with that in case of using fully controlled switches is poorer with both even and odd number of circular winding sections or the number of power switch pairs, and the rectified voltage adjustment range decreases by 10–12% for the case when the level of ripple coefficients does not exceed 10%.

Key words: rectifier, transformer with rotating magnetic field, multiphase converters, rectified voltage quality, control method, control stages, step-chord control method

REFERENCES

1. Cherevko A.I., Muzyka M.M., Limonnikova E.V. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2008, No. 10, pp. 22–28.

2. Muzyka M.M., Cherevko A.I., Platonenkov S.V. *Sbornik dokladov na nauchno-prakticheskikh konferentsiyakh – in Russ. (Proc. of the scientific-practical conferences)*. Severodvinsk, 2010, pp. 106–113.

3. Cherevko A.I., Bazanov V.A., Muzyka M.M. *Sistemy upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami, vypolnennymi na transformatorov s vrashchayushchimisya magnitnymi polyavb* (Control systems of semiconductor converters constructed using transformers with rotating magnetic fields). Arkhanogel'sk. State University, 2005, 92 p.

4. Cherevko A.I., Muzyka M.M., Platonenkov S.V., Sakovich I.A., Kuz'min I.Yu. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2012, No. 4, pp. 41–45.

5. Rozanov Yu.K., Ryabchitskii M.V., Kvasnyuk A.A. *Silovaya elektronika* (Power electronics). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2007, 217 p.

6. Sakovich I.A. *Osobennosti kommutatsii nepolnost'yu upravlyayemykh silovykh klyuchei upravlyayemogo vypryamitelya na baze transformatora s vrashchayushchimsya magnitnym polem s chetnym chislom sektsii krugovoi obmotki. Sbornik «Sovremennaya*

nauka: teoreticheskii i prakticheskii vzglyad», ch.2.4. (Specific features pertinent to the switching processes of partially controlled power switches in a controlled rectifier on the basis of a transformer with rotating magnetic field and with an even number of circular winding sections. – in: Modern Science: a Theoretical and Practical Outlook). Ufa, Bashkirskii State University, 2013, 143 p.

7. Sakovich I.A. *Osobennosti kommutatsii nepolnost'yu upravlyayemykh silovykh klyuchei upravlyayemogo vypryamitelya na baze transformatora s vrashchayushchimsya magnitnym polem s nechetnym chislom sektsii krugovoi obmotki. Sbornik «Sovremennaya nauka: teoreticheskii i prakticheskii vzglyad», ch.2.4.* (Specific features pertinent to the switching processes of partially controlled power switches in a controlled rectifier on the basis of a transformer with rotating magnetic field and with an uneven number of circular winding sections. – in: Actual Problems of Modern Science). Ufa, Bashkirskii State University, 2013, 239 p.