

9. Pronikov, A. S. Nadezhnost mashin. M.: Mashinostroenie, 1978.

10. Dedkov, V. K., and B. S. Severcev. *Osnovnye voprosy jekspluatacii slozhnyh sistem*. M.: Vysshaja shkol, 76.

1976.

11. Cikarev, V. E. Modeli nadezhnostii jeffektivnosti sistem. Kiev.: Naukova dumka, 1989.

12. Zelencov, V. A., and A. A. Gagin. *Nadezhnost, zhivuchest i tehnicheskoe obsluzhivanie setej svjazi*. M.: izd-vo MO SSSR, 1991.

13. Vlasov, A. B., and S. A. Buev. "Estimation of indicators of ship electrical equipment reliability, influence on the marine safety and probability of insurance risks." *VESTNIK OF MSTU* 16.4 (2013): 672–680.

14. Golovko, Sergey Vladimirovich. "Algorithmic support of ship control systems with anticipatory failure diagnosis." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2011): 28–31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каракаев Александр Бахтыреевич доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» aleksandr.karakaev@list.ru, kaf_ose@gumrf.ru Луканин Андрей Владимирович кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» andrey.lukanin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Karakaev Aleksandr Bahtireevich — Dr. of Technical Sciences, professor. Admaral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping aleksandr.karakaev@list.ru, a.karakaev@gumrf.ru Lukanin Andrey Vladimirovich — PhD, associate professor. Admaral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping andrey.lukanin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.

УДК621.314.69

И. А. Сакович, А. И. Черевко, Е. В. Лимонникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ НА БАЗЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Описан новый метод параметрического математического моделирования управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформатора с вращающимися магнитными полями с любым числом секций вторичной круговой обмотки. Для расчета взаимоиндуктивных связей внутри полуобмоток круговой обмотки и между ними предлагается использование диагонально-постоянной матрицы Теплица. Приводятся выражения, позволяющие упростить описание электромагнитных процессов и составляющие суть нового метода математического описания данных выпрямителей. Представлены результаты математического моделирования работы управляемого выпрямителя в MATLAB для известных классических и новых импульсно-фазовых способов управления: для способа управления, дающего удвоенное число пульсаций, для случая, когда круговая обмотка содержит четное число секций, и для ступенчато-хордового способа управления. Сделаны выводы о перспективности применения данного способа математического моделирования при исследовании других типов преобразователей энергии, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями, а также различных способов управления преобразователями с использованием широких возможностей MATLAB.

Ключевые слова: трансформатор с вращающимся магнитным полем, математическое моделирование, способ управления, выпрямитель, полупроводниковый преобразователь, круговая обмотка.



Математическое моделирование в исследовании ТВМП

При проектировании управляемых выпрямителей (УВ), построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями (ТВМП), содержащих первичную трехфазную обмотку (ТО) и вторичную круговую обмотку (КО) [1] – [3], которая может иметь различное число секций, требуется определить параметры как самого ТВМП, так и реализуемого способа управления. Применение новых способов управления, рассмотренных в работах [4], [5], отличных от импульсно-фазовых [6] – [8], значительно улучшает качество преобразуемой электрической энергии, предоставляет новые возможности по регулированию выходного напряжения. Необходимость сравнительной оценки качества электрической энергии и параметров УВ на этапе проектирования обуславливает важность применения математического моделирования.

В работах [8] – [12] были рассмотрены математические модели УВ с ТВМП, реализованные в MATLAB Simulink и Microcap. Однако проведение моделирования для произвольного числа секций КО ТВМП сопровождается значительным усложнением структуры моделей при увеличении числа секций КО, что объясняется значительным ростом числа дифференциальных уравнений, описывающих установившиеся состояния электромагнитных процессов. Важность оценки параметров УВ с ТВМП при различном количестве секций КО, а также произвольном алгоритме управления определило необходимость разработки новой параметрической математической модели.

Геометрическая аналогия

круговой обмотки в задачах анализа преобразователей с ТВМП

В ряде публикаций [4] – [6] для рассмотрения электромагнитных процессов в преобразователях, выполненных на базе ТВМП, было предложено использовать геометрическую аналогию его КО, что позволило установить связь между количеством пульсаций выходного напряжения и количеством секций КО (N) при различном их значении. Геометрически КО можно представить в виде правильного N-угольника (рис. 1). Такая геометрическая интерпретация КО ТВМП позволяет получать аналитические соотношения, основываясь на взаимных геометрических соотношениях между секциями КО и фазными обмотками ТО.



Выпуск 3 (37) 2016

Рис. 1. Расчетная схема замещения УВ с ТВМП на первом этапе коммутации



Коммутация силовых ключей УВ с ТВМП представляет собой итерационное переключение секций КО в соответствии с алгоритмом управления. В классических импульсно-фазовых алгоритмах управления, [6] – [8], одновременно работают один силовой ключ (СКл) анодной и один СКл катодной группы, подключая отводы КО к нагрузке и разделяя ее тем самым условно на две полуобмотки. Поочередное переключение СКл в соответствии с частотой и направлением вращения результирующего вектора магнитной индукции ТВМП позволяет получать N пульсаций в выходном напряжении, если КО содержит четное число секций, и 2N пульсаций, если КО содержит нечетное число секций, и 2N пульсаций, если КО содержит нечетное число секций. Разделение КО на две полуобмотки происходит и при использовании новых способов управления.

Так как аналитическое рассмотрение электромагнитных процессов в УВ с ТВМП требует учета индуктивных связей между всеми секциями КО и между секциями КО и фазными обмотками ТО, то их влияние друг на друга предлагается описывать с учетом симметрии КО. Разделение КО на две полуобмотки позволяет упростить выражения для тока в каждой секции КО, если рассматривать полуобмотку как совокупность магнитосвязанных секций, пространственно сдвинутых на угол $2\pi/N$.

Описание электромагнитных процессов в УВ с ТВМП

Для анализа соотношений со взаимоиндуктивностями удобно использовать диагональнопостоянную *N*-размерную матрицу Теплица, матрицу поворачивающих коэффициентов, элементы которой являются аргументами косинуса в функции нахождения взаимоиндуктивности между двумя секциями КО, одна из которых имеет порядковый номер *i*, а другая *j*, и задаются выражением

$$\Psi_{i,j} = \left| i - j \right|. \tag{1}$$

Для N = 8 матрица поворачивающих коэффициентов будет иметь вид равенства

$\Psi _{N=8} =$	(0)	1	2	3	4	5	6	7)		
	1	0	1	2	3	4	5	6		
	2	1	0	1	2	3	4	5		
	3	2	1	0	1	2	3	4		
	4	3	2	1	0	1	2	3		
	5	4	3	2	1	0	1	2		
	6	5	4	3	2	1	0	1		
	7	6	5	4	3	2	1	0)		

Так как пространственный сдвиг между двумя смежными секциями КО составляет $2\pi/N$ рад, то матрица взаимоиндуктивностей M, в которой элемент $M_{i,j}$ определяет взаимоиндуктивность между *i*- и *j*-й секциями КО (рис. 1), будет определяться выражением (3), где L_c — индуктивность секции КО; k — коэффициент магнитной связи:

$$M = kL_C \cos\left(\Psi \cdot \frac{2\pi}{N}\right). \tag{3}$$

Пусть первая полуобмотка КО имеет Ns_1 секций, а вторая полуобмотка КО — $Ns_2 = N - Ns_1$. Тогда Ms_{11} — сумма всех взаимоиндуктивностей между каждой секцией первой полуобмотки КО, учитываемая при расчете напряжения на её секциях — будет определяться суммой элементов Ns_1 -размерной подматрицы матрицы M, первый элемент которой совпадает с первым элементом матрицы M, а главная диагональ удалена (т. е. за вычетом значения kL_cNs_1) (4). Ms_{22} — сумма всех взаимоиндуктивностей между каждой секцией второй полуобмотки КО — будет определяться суммой элементов Ns_2 -размерной подматрицы матрицы матрицы M, первый элемент которой является элементом матрицы M, стоящим на пересечении первого столбца и $(1+Ns_1)$ -й строки (5).



Выпуск 3 (37) 2016

$$Ms_{11} = -kL_C Ns_1 + \sum_{i=1}^{Ns_1} \sum_{j=1}^{Ns_1} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{Ns_1-1} \left(2x \cos\left(\left(Ns_1 - x \right) \frac{2\pi}{N} \right) \right);$$
(4)

$$Ms_{22} = -kL_C Ns_2 + \sum_{i=1}^{Ns_2} \sum_{j=1}^{Ns_2} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{Ns_2-1} \left(2x \cos\left(\left(Ns_2 - x \right) \frac{2\pi}{N} \right) \right).$$
(5)

 Ms_{12} — сумма всех взаимоиндуктивностей от каждой секции одной полуобмотки к каждой секции другой полуобмотки — будет определяться суммой элементов подматрицы матрицы M (6), первый элемент которой стоит на пересечении первого столбца и Ns_1 -й строки и имеющей размер Ns_2 строк на Ns_1 столбцов.

$$Ms_{12} = \sum_{i=1+Ns_1}^{N} \sum_{j=1}^{Ns_1} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{Ns_1-1} \left(\sum_{y=1}^{Ns_2-1} \cos\left(\left(x+y-1 \right) \frac{2\pi}{N} \right) \right).$$
(6)

Сумма всех взаимоиндуктивностей между каждой секцией рассматриваемой полуобмотки КО и секцией ТО будет определяться подобным образом, но с учетом пространственного углового сдвига секции ТО относительно целой полуобмотки КО, а также угла управления α.

Электромагнитные процессы в УВ с ТВМП в установившихся состояниях описываются формулами (7) – (12):

$$\begin{aligned} e_{a}(t) - e_{b}(t) &= (L_{TO} - M_{TO}) \left(\frac{d}{dt} i_{a}(t) - \frac{d}{dt} i_{b}(t) \right) + R_{TO} \left(i_{a}(t) - i_{b}(t) \right) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) - \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{i}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=K(n)}^{K(n)+N_{A}(n)-1} \left(- \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) + \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{i}(t); \\ e_{b}(t) - e_{c}(t) &= (L_{TO} - M_{TO}) \left(\frac{d}{dt} i_{b}(t) - \frac{d}{dt} i_{c}(t) \right) + R_{TO} \left(i_{b}(t) - i_{c}(t) \right) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) - \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{i}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{K(n)+N_{A}(n)-1} \left(- \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{i}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+N_{A}(n)-1} \left(- \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{i}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{i}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{i}(t) + \\ &- k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_{a}(t) - \\ &- k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_{a}(t) + \\ &- k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_{a}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{K(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_{a}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{K(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_{a}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{K(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_{a}(t) + \\ &+ k \sqrt{L_{TO}L_{C}} \sum_{x=A(n)}^{K(n)+N_{A}(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_{a}(t$$



$$i_{c}(t) = -i_{a}(t) - i_{b}(t);$$
 (11)

$$i_{d}(t) = i_{I}(t) + i_{II}(t).$$
(12)

В уравнениях (7) – (12) L_{TO} , R_{TO} — индуктивность и сопротивление секций TO; $e_a(t)$, $e_b(t)$, $e_c(t)$ — мгновенные значения фазных ЭДС трехфазной питающей сети; L_c и R_c — индуктивность и сопротивление секций KO; L_d , R_d и $e_d(t)$ — индуктивность, сопротивление и мгновенное значение собственной ЭДС нагрузки; A(n) и K(n) — анодный и катодный силовые ключи для *n*-временного этапа коммутации; $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ — токи в секциях TO; $i_l(t)$, $i_{ll}(t)$ — мгновенные значения токов в первой и второй полуобмотках KO; α — угол управления; Δ — пространственный фазовый сдвиг между фазной обмоткой фазы A TO и первой секцией KO.

Решение системы дифференциальных уравнений (7) – (10) относительно вектора дифференциалов искомых токов ($di_a(t)/dt$, $di_b(t)/dt$, $di_l(t)/dt$, $di_l(t)/dt$, $di_c(t)/dt$, $di_d(t)/dt$)^T, выраженного из (7) – (12), дает мгновенные значения соответствующих токов в секциях ТО и в полуобмотках КО, а также в нагрузке, позволяя произвести расчет значений интересующих напряжений.

Результаты моделирования

Результаты моделирования УВ с ТВМП с *N*=8 секциями КО при классическом способе управления, полученные в МАТLAВ без использования Simulink с помощью функции *ode15s* для решения жестких дифференциальных уравнений методом обратного дифференцирования, показаны на рис. 2 – 4. Рис. 5 и 6 отображают результаты моделирования ступенчато-хордового способа управления, а рис. 7 — способа управления, дающего удвоенное число пульсаций по сравнению с классическим способом управления. Для сохранения наглядности формы пульсаций сопротивление и индуктивность нагрузки выбраны незначительными. Полученные результаты согласуются с аналитическим описанием и результатами испытаний опытного образца УВ с ТВМП мощностью 4 кВт, в котором был реализован классический способ управления, проведенных АО «СПО «Арктика» в ходе выполнения опытно-конструкторской работы, выполняемой в рамках федерально-целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 гг. [13]. Это позволяет получить соответствие между моделированием и результатами работы УВ с ТВМП при применении ступенчато-хордового способа управления, когда КО содержит произвольное число секций и способа управления, дающего удвоенное число пульсаций в выходном напряжении, когда КО выполнена с четным числом секций.



Bbinyck 3 (37) 2016 161



Выводы

Преимуществом разработанной модели является возможность ее параметризации, т. е. изменения параметров модели путем задания исходных данных для моделирования: числа секций круговой обмотки (как четного, так и нечетного), параметров трехфазной питающей сети, в том числе ее асимметрии, параметров ТВМП (сопротивлений и индуктивностей секций КО и ТО), параметров нагрузки. Предлагаемая математическая модель позволяет также исследовать различные способы управления, в том числе ступенчато-хордовый способ, описанный в работах [4], [5], и способ управления, дающий удвоенное число пульсаций в выходном напряжении УВ с ТВМП



при четном числе секций КО. Модель позволяет проводить анализ переходных процессов, аварийных режимов, анализировать влияние несимметрии питающих напряжений на качество выпрямленного напряжения. Так как выходными данными модели для каждого шага моделирования являются векторы мгновенных значений токов, то, интерполируя их средствами MATLAB, можно проводить исследования с применением методов цифровой обработки сигналов, в том числе использовать БПФ для спектрального анализа, предварительно проведя выравнивание и децимацию по времени до количества выборок, кратного числу, являющемуся целой степенью двойки.

Анализ геометрической интерпретации обмоток ТВМП позволяет упростить математическое описание электромагнитных процессов, происходящих в УВ с ТВМП, одновременно дополнив его новыми возможностями в части изменения исходных данных. Описанный метод позволяет разрабатывать математические модели как для различных конструкций управляемых выпрямителей [14], так и для других, построенных на базе ТВМП преобразователей, рассматриваемых в публикациях [15] – [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2525298 Российская Федерация, МПК Н 01 F 30/14, Н 02 М 5/14. Трансформатор с трехфазной и круговой обмотками / Кузьмин И. Ю., Лимонникова Е. В., Музыка М. М., Платоненков С. В., Потего П. И., Сакович И. А., Телепнев А. И., Черевко А. И.; заявитель ОАО «СПО «Арктика»; патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли. — № 2012144789/07; заявл. 23.10.12; опубл. 10.08.14, Бюл. № 22. — 10 с.

2. 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.

3. *Коптяев Е. Н.* Трансформатор с вращающимся магнитным полем как структура с дополнительной степенью свободы / Е. Н. Коптяев, В. М. Балашевич, П. В. Атрашкевич [и др.] // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 1 (26). — С. 73. DOI: 10.15862/93TVN115.

4. Платоненков С. В. Ступенчато-хордовый алгоритм управления выпрямителем, построенным на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / С. В. Платоненков // Материалы XIII молодежной науч.-технич. конф. «Взгляд в будущее — 2015». — СПб.: ОАО ЦКБ МТ «Рубин», 2015. — С. 453–459.

5. *Сакович И. А.* Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / И. А. Сакович, А. И. Черевко, С. В. Платоненков // Электричество. — 2016. — № 1. — С. 43–49.

6. Черевко А. И. Качество выходного напряжения выпрямителя, построенного на базе ТВМП, при чётном и нечётном числе секций КО ТВМП / А. И. Черевко, М. М. Музыка, С. В. Платоненков [и др.] // Электротехника. — 2012. — № 4. — С. 41–45.

7. Музыка М. М. Алгоритмы работы силовых ключей в составе коммутаторов управляемых выпрямителей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями / М. М. Музыка, А. И. Черевко, С. В. Платоненков [и др.] // Инновационное развитие северных территорий России: образование, наука, производство: сб. докладов на науч.-практич. конф. — Северодвинск, 2010. — С. 106–113.

8. Музыка М. М. Совершенствование полупроводниковых преобразователей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями в судовых электротехнических системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / М. М. Музыка. — Северодвинск, 2008.

9. Черевко А. И. Схемотехническое и математическое моделирование полупроводниковых преобразователей, содержащих согласующие трансформаторы с вращающимися магнитными полями: монография; под ред. А. И. Черевко / А. И. Черевко, М. М. Музыка, Е. В. Лимонникова. — Архангельск: ИД САФУ, 2005. — 179 с.

10. Сингаевский Н. А. Математическая модель ТВП в системе Matlab / Н. А. Сингаевский, Н. А. Суртаев // Материалы междунар. науч. конф. «Технические и технологические системы». — Краснодар: Куб-ГАУ, 2009. — С. 103–107.

11. *Музыка М. М.* Исследование эффективности работы управляемых выпрямителей методами математического моделирования в МС и/или Matlab: монография; под ред. А. И. Черевко. / М. М. Музыка [и др.]. — Архангельск: ИД САФУ, 2014. — 107 с.



12. Сингаевский Н. А. Теоретические и схемотехнические основы силовых полупроводниковых преобразователей на базе многофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Н. А. Сингаевский. — Краснодар, 2011.

13. *Кузьмин И. Ю*. Сравнительный анализ параметров и характеристик управляемых выпрямителей, построенных на базе ТВМП, разработанных для кораблей и судов арктического региона, с отечественными выпрямителями / И. Ю. Кузьмин // Материалы XIII молодежной науч.-технич. конф. «Взгляд в будущее – 2015». — СПб.: ОАО ЦКБ МТ «Рубин», 2015. — С. 324–340.

14. *Григораш О. В.* Выпрямители на трансформаторах с вращающимся магнитным полем / О. В. Григораш, Г. С. Отмахов // Научный журнал КубГАУ. — 2014. — № 98. — С. 560–570.

15. Коптяев Е. Н. Статические полупроводниковые преобразователи с повышенной надежностью и электромагнитной совместимостью на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем / Е. Н. Коптяев, В. М. Балашевич, П. В. Атрашкевич, И. Ю. Кузьмин // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 1 (26). — С. 72. DOI: 10.15862/92TVN115.

16. Коптяев Е. Н. Система электродвижения морских судов / Е. Н. Коптяев // Сб. науч. статей «Развитие науки в XXI веке: естественные и технические науки». — 2015. — Апрель. — С. 77–86. DOI: 10.17809/06(2015)-10.

17. Коптяев Е. Н. Промышленный умножитель частоты на базе трансформатора с вращающимся полем / Е. Н. Коптяев, В. М. Балашевич, П. В. Атрашкевич // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 2 (27). — С. 104.

MATHEMATICAL MODELING OF CONTROLLED RECTIFIERS BASED ON ROTATING MAGNETIC FIELD TRANSFORMERS

The new principle of parametric mathematical modeling of controlled rectifiers made using the transformer with rotating magnetic field made with different number of sections of the secondary circular winding and based on it is described. It is offered to applying the Toeplitz matrix for calculating the mutual inductances between half-windings of the circular winding and between of these. Given expressions allow simplifying the description of electromagnetic processes and composing the method essence of the new mathematical description of these rectifiers. Results of mathematical modeling in MATLAB of operation of controlled rectifier for classical and new phase-pulse control method: for the method that's given double number of pulses in case when the circular winding containing even number of sections and for step-chord method are given. Summary of perspective implementation of this principle for mathematical modeling by using wide MATLAB resources for analysis other types of energy converters made with transformer with rotating magnetic field and for different control algorithms are made.

Keywords: transformer with rotating magnetic field; mathematical modeling; control method; rectifier unit; semiconductor converter; circular winding.

REFERENCES

1. Kuzmin, I. Yu., E. V. Limonnikova, M. M. Muzyka, S. V. Platonenkov, P. I. Potego, I. A. Sakovich, A. I. Telepnev, and A. I. Cherevko. Transformator s trehfaznoj i krugovoj obmotkami. Russian Federation, assignee. Patent 2525298. 10 August 2014.

2. Senkov, A. A., A. P. Senkov, and A. N. Kalmykov. Mnogofaznyj transformator. Russian Federation, assignee. Patent 2534218. 27 November 2013.

3. Koptyaev, E. N., V. M. Balashevich, P. V. Atrashkevich, Yu. V. Dushkin, and I. V. Kuznetsov. "A transformer with rotating magnetic field as structure with addition degree of freedom." *On-line Journal "Naukovedenie"* 7.1(26) (2015): 73. DOI: 10.15862/93TVN115.

4. Platonenkov, S. V. "Stupenchato-hordovyj algoritm upravlenija vyprjamitelem, postroennym na baze transformatora s vrashhajushhimsja magnitnym polem." *Materialy XIII molodezhnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii «Vzgljad v budushhee — 2015»*. SPb.: OAO «CKB MT «Rubin», 2015: 453–459.

5. Sakovich, I. A., A. I. Cherevko, and S. V. Platonenkov. "Kachestvo vyhodnogo naprjazhenija upravljaemogo vyprjamitelja na baze transformatora s vrashhajushhimsja magnitnym polem." *Electrical Technology Russia* 1 (2016): 43–49.



6. Cherevko, A. I., M. M. Muzyka, S. V. Platonenkov, I. A. Sakovich, and I. Yu. Kuzmin. "Kachestvo vyhodnogo naprjazhenija vyprjamitelja, postroennogo na baze TVMP, pri chjotnom i nechjotnom chisle sekcij KO TVMP." *Russian Electrical Engineering* 4 (2012): 41–45.

7. Muzyka, M. M., A. I. Cherevko, S. V. Platonenkov, et al. "Algoritmy raboty silovyh kljuchej v sostave kommutatorov upravljaemyh vyprjamitelej s transformatorami s vrashhajushhimisja magnitnymi poljami." *Innovacionnoe razvitie severnyh territorij Rossii: obrazovanie, nauka, proizvodstvo: sbornik dokladov na nauchno-prakticheskih konferencijah.* Severodvinsk, 2010: 106–113.

8. Muzyka, M. M. Sovershenstvovanie poluprovodnikovyh preobrazovatelej s transformatorami s vrashhajushhimisja magnitnymi poljami v sudovyh jelektrotehnicheskih sistemah. PhD diss. Severodvinsk, 2008.

9. Cherevko, A. I., M. M. Muzyka, and E. V. Limonnikova. Shemotehnicheskoe i matematicheskoe modelirovanie poluprovodnikovyh preobrazovatelej, soderzhashhih soglasujushhie transformatory s vrashhajushhimisja magnitnymi poljami: monografija. Arhangelsk: ID SAFU, 2005.

10. Singaevskij, N. A., and N. A. Surtaev. "Matematicheskaja model TVP v sisteme Matlab." *Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Tehnicheskie i tehnologicheskie sistemy»*. Krasnodar: KubGAU, 2009: 103–107.

11. Muzyka, M. M., et al. Issledovanie jeffektivnosti raboty upravljaemyh vyprjamitelej metodami matematicheskogo modelirovanija v MS i/ili Matlab: monografija. Arhangelsk: ID SAFU, 2014.

12. Singaevskij, N. A. Teoreticheskie i shemotehnicheskie osnovy silovyh poluprovodnikovyh preobrazovatelej na baze mnogofaznyh transformatorov s vrashhajushhimsja magnitnym polem. Dr. diss. Krasnodar, 2011.

13. Kuzmin, I. Ju. "Sravnitelnyj analiz parametrov i harakteristik upravljaemyh vyprjamitelej, postroennyh na baze TVMP, razrabotannyh dlja korablej i sudov arkticheskogo regiona, s otechestvennymi vyprjamiteljami." *Materialy XIII molodezhnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii «Vzgljad v budushhee — 2015».* SPb.: OAO «CKB MT «Rubin», 2015: 324–340.

14. Grigorash, O. V., and G. S. Otmahov. "The rectifier on transformers with rotating magnetic field." *Scientific Journal of KubSAU* 98 (2014): 560–570.

15. Koptyaev, E. N., V. M. Balashevich, P. V. Atrashkevich, Ju. V. Dushkin, and I. V. Kuznetsov. "Static semiconductor converters with improved reliability and electromagnetic compatibility on the basis of a transformer with a rotating magnetic field." *On-line Journal «Naukovedenie*" 7.1(26) (2015): 72. DOI: 10.15862/92TVN115.

16. Koptyiaev, E. N. "The system of electrical motions of marine vessels." *The Development of Science in the 21st Century: Natural and Technical Sciences* апрель (2015): 77–86. DOI: 10.17809/06(2015)-10.

17. Koptyaev, E. N., V. M. Balashevich, and P. V. Atrashkevich. "Industrial frequency multiplier based on a transformer with a rotating field." *On-line Journal "Naukovedenie"* 7.2(27) (2015): 104.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сакович Игорь Александрович руководитель группы разработки и внедрения информационных технологий ЗАО «Биус» igorsakovitch@gmail.com Черевко Александр Иванович доктор технических наук, профессор. ИСМАРТ САФУ cherevko-ai@mail.ru Лимонникова Елена Владимировна кандидат технических наук. ИСМАРТ САФУ e.limonnikova@narfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sakovich Igor Aleksandrovich — Head of the development team. "Bius" *igorsakovitch@gmail.com. Cherevko Aleksander Ivanovich* — Dr. of Technical Sciences, professor. Branch of the North (Arctic) Federal University (NFU) *cherevko-ai@mail.ru Limonnikova Elena Vladimirovna* — PhD. Branch of the North (Arctic) Federal University (NFU) *e.limonnikova@narfu.ru*.

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2016 г.