

УДК 621.314.69

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-71-77

Аналитическое описание управляемых выпрямителей на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем с двумя круговыми обмотками

И.А. Сакович, А.И. Черевко, И.Ю. Кузьмин

Описаны электромагнитные процессы в управляемых выпрямителях, построенных с использованием трансформатора с вращающимся магнитным полем в задачах параметрического математического моделирования.

На основе применения матрицы поворачивающих коэффициентов предложен новый подход к решению проблемы необходимости учета всех взаимоиндуктивных связей внутри трансформатора с вращающимся магнитным полем, конструктивно содержащего первичную трехфазную и две вторичные круговые обмотки, при описании электромагнитных процессов в управляемых выпрямителях. Приведено обоснование возможности снижения количества дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы, до фиксированного значения вне зависимости от числа секций в круговых обмотках трансформатора и применяемых способов управления, в том числе отличных от классических. Важность этого объясняется тем, что с увеличением числа секций даже единственной круговой обмотки значительно усложняется описание электромагнитных процессов в управляемом выпрямителе на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем. В трансформаторе, конструктивно содержащем две круговые обмотки, взаимоиндуктивных связей будет гораздо больше, что обуславливает дополнительные сложности при моделировании таких выпрямителей. С ростом числа секций круговых обмоток также растет многообразие возможных вариантов алгоритмического управления силовым коммутатором выпрямителя.

Представлены выражения, описывающие электромагнитные процессы в управляемых выпрямителях, построенных на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем, содержащего трехфазную и две вторичные круговые обмотки, последовательно подключенные к нагрузке.

Предложен новый подход к параметрическому математическому моделированию управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем с любым числом секций вторичных круговых обмоток, основанный на их симметрии. Для расчета взаимоиндуктивных связей внутри полуобмоток круговых обмоток и между ними предложено использование матрицы поворачивающих коэффициентов. Приведены выражения, позволяющие упростить описание электромагнитных процессов и составляющие основную суть нового метода математического описания данных выпрямителей, отличного от существующих методов, лежащих в основе моделей выпрямителей, реализованных в MATLAB Simulink и Microcap. Сделаны выводы о перспективном применении данного подхода к математическому моделированию при исследовании других типов преобразователей энергии, построенных на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем, а также различных способов управления с использованием широких возможностей MATLAB.

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

Для цитирования: Сакович И.А., Черевко А.И., Кузьмин И.Ю. Аналитическое описание управляемых выпрямителей на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем с двумя круговыми обмотками // Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 71—77. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-71-77.

An Analytical Description of Controlled Rectifiers Made Using a Transformer with Rotating Magnetic Field and Containing Two Circular Windings

I.A. Sakovich, A.I. Cherevko, I.Yu. Kuz'min

The electromagnetic processes in controlled rectifiers constructed using a transformer with a rotating magnetic field are described in application to parametric mathematical modeling problems.

The need of taking into account all mutually inductive links in a transformer with a rotating magnetic field and structurally containing a primary three-phase winding and two secondary circular windings, which arises in describing the electromagnetic processes in controlled rectifiers, is pointed out, and a new approach to solving this problem by applying the matrix of rotational coefficients is proposed.

The article substantiates the possibility of decreasing the number of differential equations describing electromagnetic processes to a fixed value whatever the number of sections in the transformer's circular windings and whatever the control methods used, including those differing from the

classical ones. The importance of doing so is stemming from the fact that with increasing the number of sections in even a single circular winding, the description of electromagnetic processes in a controlled rectifier based on a transformer with a rotating magnetic field becomes much more complicated. In a transformer the design of which involves the use of two circular windings, the number of mutual inductive links will be much larger, due to which additional difficulties will arise in modeling such rectifiers. In addition, with a larger number of sections contained in the circular windings, a greater variety of options for algorithmic control of the rectifier power switches becomes available.

Expressions describing the electromagnetic processes in controlled rectifiers made using a transformer with a rotating magnetic field and containing a three-phase and two secondary circular windings connected in series to the load are presented.

A new approach to parametric mathematical modeling of controlled rectifiers made using a transformer with a rotating magnetic field and containing any number of sections in the secondary circular windings is proposed, which is based on the winding symmetry properties. A matrix of rotational coefficients is proposed to be used for calculating the mutual inductances inside the sections of circular half-windings and between them. Expressions simplifying the description of electromagnetic processes and constituting the essence of the new method for mathematically describing such rectifiers are presented, and a distinction is drawn between the proposed method and the existing methods for constructing the rectifier models implemented in the Matlab Simulink and Microcap software environments. Conclusions about the prospects of applying the developed approach to mathematical modeling in studying other types of energy converters built on the basis of a transformer with a rotating magnetic field, as well as various control methods using the wide possibilities of the Matlab software package, have been drawn.

Key words: transformer with rotating magnetic field, mathematical modeling, control method, rectifier, semiconductor converter, circular winding.

For citation: Sakovich I.A., Cherevko A.I., Kuz'min I.Yu. An Analytical Description of Controlled Rectifiers Made Using a Transformer with Rotating Magnetic Field and Containing Two Circular Windings. MPEI Vestnik. 2017; 5: 71—77. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-71-77.

Управляемые выпрямители с трансформаторами с вращающимися магнитными полями (УВ с ТВМП) обладают улучшенной электромагнитной совместимостью как с питающей сетью, так и с нагрузкой [1—5], что в значительной степени обусловлено применением ТВМП. В общем случае ТВМП содержит трехфазную (ТО) и многосекционную круговую (КО) обмотки с четным или нечетным числом секций N [1, 2, 6]. Трехфазная обмотка трансформатора подключается к питающей сети, а отводы КО с помощью силового полупроводникового коммутатора — на сборные шины УВ, а уже с них выпрямленное напряжение U_d подается в нагрузку. Многофазность преобразования напряжения обеспечивается многосекционностью КО.

Описаны электромагнитные процессы в УВ, когда трансформатор содержит две вторичные круговые обмотки, последовательно подключаемые к нагрузке посредством собственных силовых полупроводниковых коммутаторов, с заданным пространственным сдвигом.

Классические алгоритмы импульсно-фазового управления полупроводниковым коммутатором УВ с ТВМП задают деление круговой обмотки на две полуобмотки (ПО), содержащие равное число секций в случае, когда общее число секций в круговой обмотке четное, и отличающиеся на единицу при нечетном числе [5—7].

Разработанные новые способы управления предусматривают возможность применения в круговой обмотке произвольного числа секций, которое определяется в соответствии с заданным алгоритмом управления выпрямителем [8—10].

Методика моделирования, описанная в [5, 11, 12], требует составления дифференциальных уравнений (ДУ) для токов каждой секции круговых обмоток, поэтому с ростом числа секций увеличивается порядок системы ДУ. Задача учета всех взаимоиндуктивных связей внутри ТВМП между фазами трехфазной об-

мотки и секциями круговых обмоток дополнительно осложняется многовариантностью алгоритмического управления силовыми коммутаторами УВ.

С увеличением секционности круговой обмотки значительно усложняется описание электромагнитных процессов в ТВМП, имеющем одну круговую обмотку. В ТВМП, конструктивно содержащем две круговые обмотки, взаимоиндуктивных связей будет гораздо больше, что обуславливает дополнительные сложности при моделировании УВ с ТВМП.

Все это подтверждает возрастающую сложность использования методов математического моделирования в MATLAB Simulink и схемотехнического моделирования в Microcap, описанных в [5, 11, 12], ввиду значительного роста количества ДУ, а значит, усложнения структуры моделей при росте числа секций круговых обмоток ТВМП.

Поскольку секции, коммутационно объединяемые в полуобмотки, обтекаются равными токами, количество ДУ, описывающих токи в круговой обмотке, может быть снижено с N до двух. При этом количество компонентов ДУ, учитывающих все взаимоиндуктивные связи между всеми секциями круговой обмотки, а также круговой и трехфазной обмоток, может быть сведено к трем. Если ТВМП содержит две круговые обмотки, количество таких компонентов равно 10.

Для решения задачи параметризации моделирования предложен новый подход к описанию электромагнитных процессов в ТВМП, заключающийся в оперировании диагонально-постоянной матрицей Тетлицы, или, по аналогии с алгоритмами быстрого преобразования Фурье, матрицей поворачивающих коэффициентов. Элементы матрицы, стоящие в i -й строке и j -м столбце, можно найти как $\Psi_{ij} = |i - j|$ и интерпретировать как шаги конструктивного сдвига секций i и j .

В отличие от описания УВ с ТВМП с одной круговой обмоткой [13], где данная матрица имеет порядок

N , для УВ с ТВМП с двумя круговыми обмотками она обладает размером $2N \times 2N$.

На рис. 1 приведена матрица поворачивающих коэффициентов размерностью 16×16 , составленная для случая, когда ТВМП содержит две круговые обмотки, в каждую из которых входит по восемь секций ($N = 8$).

Коммутационно КО1 делится на две полуобмотки, содержащие по $N1s1 = 5$ и $N1s2 = 3$ секции, а КО2 — на равные полуобмотки, содержащие по $N2s1 = N2s2 = 4$ секции (рис. 2). Алгоритмически на рассматриваемом этапе коммутации это задается включением силового ключа $A_1 = 1$ в анодной и силового ключа $K_1 = 6$ в катодной группах КО1. В КО2 в открытом состоянии будут находиться силовой ключ $A_2 = 2$ в анодной и $K_2 = 6$ в катодной группах.

Фазовый сдвиг потенциалов в отводах круговых обмоток, коммутируемых ключами анодной группы, взятый по модулю $2\pi/N$, задает сдвиг ΔA , определяющий смещение N -размерной подматрицы, составленной путем конкатенации подматриц $\Psi s_1^1, \Psi s_2^1, \Psi s_1^2$ и Ψs_2^2 условно по вертикали, если $A_2 > A_1$ и условно по горизонтали при $A_2 < A_1$ (см. рис. 1).

Учитывая четность косинуса, входящего множителем при расчете взаимоиндуктивностей, матрицу Ψ можно переопределить. В этом случае нули в подматрицах Ψs будут обозначать секции, имеющие одинаковый конструктивный сдвиг, т. е. обладающие наибольшей взаимоиндуктивностью, равной kL_C , где

k — коэффициент взаимоиндуктивной связи; L_C — индуктивность секции круговой обмотки:

$$\Psi_{ij} = \frac{N}{2} - \left| \text{mod}(|i-j|, N) - \frac{N}{2} \right|.$$

Матрицу взаимоиндуктивностей можно найти из матрицы поворачивающих коэффициентов Ψ :

$$M_{ij} = kL_C \cos\left(\Psi \frac{2\pi}{N}\right). \quad (1)$$

Учитывая, что цепь, включающая в себя нагрузку и последовательно включенные круговые обмотки, разделена на четыре независимых контура, ДУ, описывающие электромагнитные процессы в ТВМП могут быть записаны следующими формулами:

$$i_c(t) = -i_a(t) - i_b(t); \quad (2)$$

$$i_d(t) = i_1(t) + i_{II}(t); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} e_a(t) - e_b(t) = & (L_{ТО} - M_{ТО}) \left(\frac{d}{dt} i_a(t) - \frac{d}{dt} i_b(t) \right) + \\ & + R_{ТО} (i_a(t) - i_b(t)) + (Ma_1 + Mb_1) \frac{d}{dt} i_{1I}(t) - \\ & - (Ma_2 + Mb_2) \frac{d}{dt} i_{1II}(t) + (Ma^1 + Mb^1) \frac{d}{dt} i_{2I}(t) - \\ & - (Ma^2 + Mb^2) \frac{d}{dt} i_{2II}(t); \end{aligned} \quad (4)$$

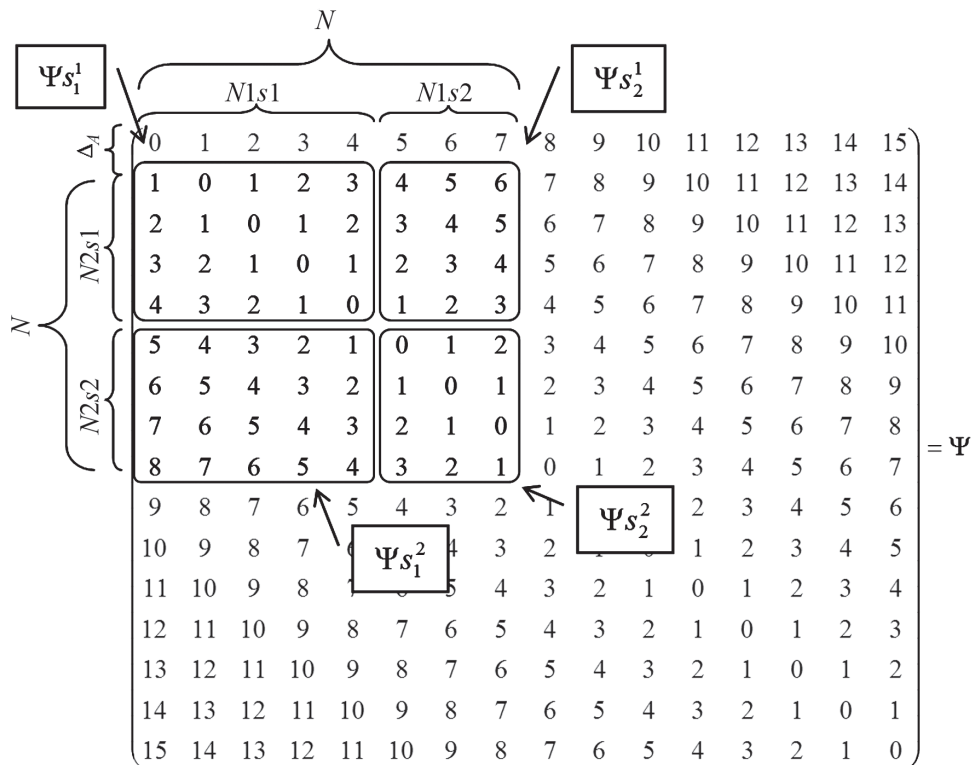


Рис. 1. Матрица Теплица, составленная для управляемого выпрямителя с трансформаторами с вращающимися магнитными полями с двумя круговыми обмотками, содержащими по 8 секций

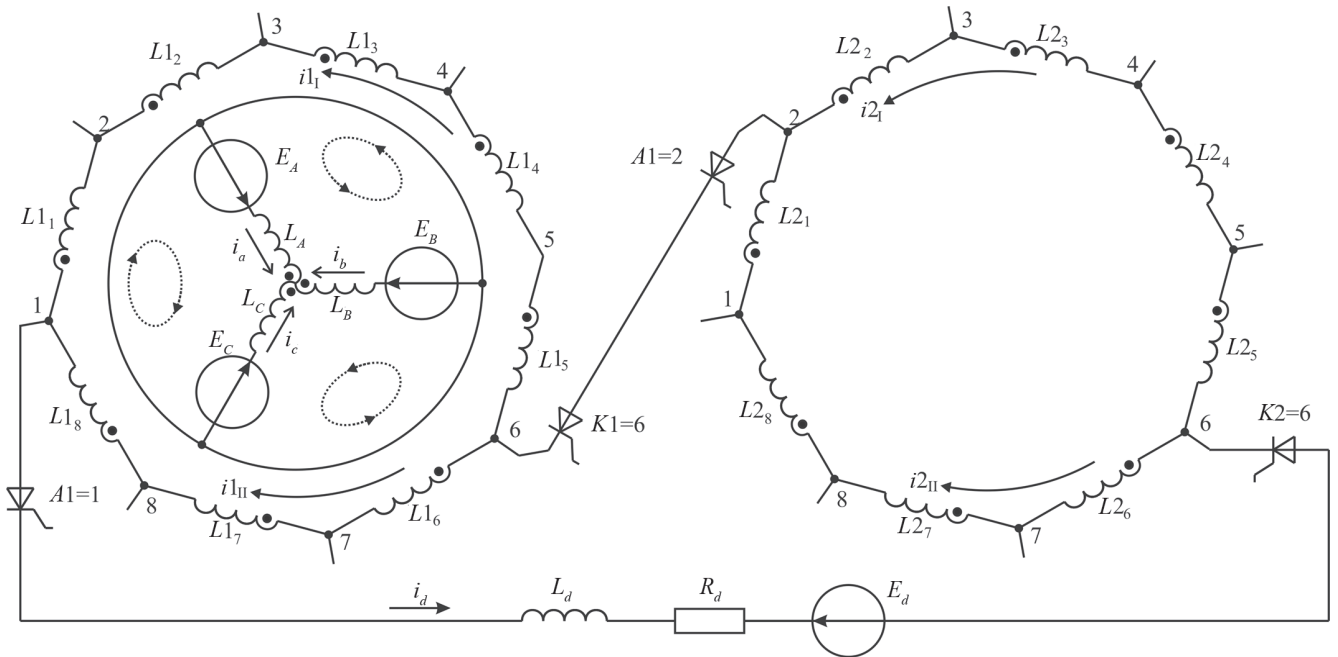


Рис. 2. Расчетная схема управляемого выпрямителя с трансформаторами с вращающимися магнитными полями с $N = 8$ и двумя последовательно включенными круговыми обмотками на первом этапе коммутации

$$\begin{aligned}
 e_b(t) - e_c(t) = & (L_{TO} - M_{TO}) \left(\frac{d}{dt} i_b(t) - \frac{d}{dt} i_c(t) \right) + \\
 & + R_{TO} (i_b(t) - i_c(t)) + (Mb_1 + Mc_1) \frac{d}{dt} i_{I1}(t) - \\
 & - (Mb_2 + Mc_2) \frac{d}{dt} i_{II1}(t) + (Mb^1 + Mc^1) \frac{d}{dt} i_{21}(t) - \\
 & - (Mb^2 + Mc^2) \frac{d}{dt} i_{2II}(t).
 \end{aligned} \quad (5)$$

Для независимых контуров, включающих в себя нагрузку и ветви КО1–ПО1, КО2–ПО1,

$$\begin{aligned}
 e_d(t) = & (N1s1L_C + M_{1,1}) \frac{d}{dt} i_{I1}(t) - M_{1,2} \frac{d}{dt} i_{II1}(t) + \\
 & + M_1^1 \frac{d}{dt} i_{21}(t) - M_1^2 \frac{d}{dt} i_{2II}(t) + \\
 & + \left(Ma_1 \frac{d}{dt} i_a(t) + Mb_1 \frac{d}{dt} i_b(t) + Mc_1 \frac{d}{dt} i_c(t) \right) + \\
 & + (N2s1L_C + M^{1,1}) \frac{d}{dt} i_{2I}(t) + R_d i_d(t) + L_d \frac{d}{dt} i_d(t) + \\
 & + M_1^1 \frac{d}{dt} i_{I1}(t) - M_2^1 \frac{d}{dt} i_{II1}(t) - M^{1,2} \frac{d}{dt} i_{2II}(t) + \\
 & + \left(Ma^1 \frac{d}{dt} i_a(t) + Mb^1 \frac{d}{dt} i_b(t) + Mc^1 \frac{d}{dt} i_c(t) \right);
 \end{aligned} \quad (6)$$

КО1–ПО2, КО2–ПО2:

$$\begin{aligned}
 e_d(t) = & (N1s2L_C + M_{2,2}) \frac{d}{dt} i_{II1}(t) - M_{1,2} \frac{d}{dt} i_{I1}(t) - \\
 & - M_2^1 \frac{d}{dt} i_{21}(t) + M_2^2 \frac{d}{dt} i_{2II}(t) - \\
 & - \left(Ma_2 \frac{d}{dt} i_a(t) + Mb_2 \frac{d}{dt} i_b(t) + Mc_2 \frac{d}{dt} i_c(t) \right) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (N2s1L_C + M^{1,1}) \frac{d}{dt} i_{2I}(t) + R_d i_d(t) + L_d \frac{d}{dt} i_d(t) + \\
 & + M_1^1 \frac{d}{dt} i_{I1}(t) - M_2^1 \frac{d}{dt} i_{II1}(t) - M^{1,2} \frac{d}{dt} i_{2II}(t) + \\
 & + \left(Ma^1 \frac{d}{dt} i_a(t) + Mb^1 \frac{d}{dt} i_b(t) + Mc^1 \frac{d}{dt} i_c(t) \right);
 \end{aligned} \quad (7)$$

КО2–ПО1, КО1–ПО2:

$$\begin{aligned}
 e_d(t) = & (N1s2L_C + M_{2,2}) \frac{d}{dt} i_{II1}(t) - M_{1,2} \frac{d}{dt} i_{I1}(t) - \\
 & - M_2^1 \frac{d}{dt} i_{21}(t) + M_2^2 \frac{d}{dt} i_{2II}(t) - \\
 & - \left(Ma_2 \frac{d}{dt} i_a(t) + Mb_2 \frac{d}{dt} i_b(t) + Mc_2 \frac{d}{dt} i_c(t) \right) + \\
 & + (N2s2L_C + M^{2,2}) \frac{d}{dt} i_{2II}(t) + R_d i_d(t) + L_d \frac{d}{dt} i_d(t) - \\
 & - M_1^1 \frac{d}{dt} i_{I1}(t) + M_2^1 \frac{d}{dt} i_{II1}(t) - M^{1,2} \frac{d}{dt} i_{21}(t) - \\
 & - \left(Ma^2 \frac{d}{dt} i_a(t) + Mb^2 \frac{d}{dt} i_b(t) + Mc^2 \frac{d}{dt} i_c(t) \right);
 \end{aligned} \quad (8)$$

$$i_{2II}(t) = i_{I1}(t) + i_{II1}(t) - i_{21}(t). \quad (9)$$

В уравнениях (2) — (9) L_{TO} , R_{TO} — индуктивность и сопротивление секций ТО; $e_a(t)$, $e_b(t)$, $e_c(t)$ — мгновенные значения ЭДС для трехфазной питающей сети; L_C , R_C — индуктивность и сопротивление секций круговых обмоток; L_d , R_d , $e_d(t)$ — индуктивность, сопротивление и собственная ЭДС нагрузки; $A1(n)$, $K1(n)$, $A2(n)$, $K2(n)$ — анодный и катодный силовые ключи для n -временного этапа коммутации для КО1 и КО2; $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ — токи в секциях ТО; $i_{I1}(t)$, $i_{II1}(t)$, $i_{21}(t)$,

$i_{2II}(t)$ — токи в первой и второй полуобмотках КО1 и КО2; α_1, α_2 — углы управления коммутаторами КО1 и КО2.

Решение системы ДУ (2) — (9) относительно вектора дифференциалов искомых токов дает мгновенные значения соответствующих токов в секциях трехфазной обмотки и в полуобмотках круговой обмотки, а также в нагрузке, позволяя рассчитать значения интересующих напряжений.

Суммы взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО1, КО1 и фазами А, В и С трехфазной обмотки определяются как

$$\begin{pmatrix} Ma_1 \\ Mb_1 \\ Mc_1 \end{pmatrix} = k\sqrt{L_{TO}L_C} \times \sum_{x=A1(n)}^{A1(n)+N1s1(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \begin{pmatrix} 0 \\ 2\pi/3 \\ -2\pi/3 \end{pmatrix} + \Delta + \alpha_1 \right) \right).$$

Здесь нижние индексы обозначают принадлежность величины к КО1, а верхние — к КО2.

Суммы взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО2, КО1 и фазами А, В и С трехфазной обмотки

$$\begin{pmatrix} Ma_2 \\ Mb_2 \\ Mc_2 \end{pmatrix} = k\sqrt{L_{TO}L_C} \times \sum_{x=K1(n)}^{K1(n)+N1s2(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \begin{pmatrix} 0 \\ 2\pi/3 \\ -2\pi/3 \end{pmatrix} + \Delta + \alpha_1 \right) \right).$$

Суммы взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО1, КО2 и фазами А, В и С трехфазной обмотки выглядят как

$$\begin{pmatrix} Ma^1 \\ Mb^1 \\ Mc^1 \end{pmatrix} = k\sqrt{L_{TO}L_C} \times \sum_{x=A2(n)}^{A2(n)+N2s1(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \begin{pmatrix} 0 \\ 2\pi/3 \\ -2\pi/3 \end{pmatrix} + \Delta + \alpha_2 \right) \right).$$

Суммы взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО2, КО2 и фазами А, В и С трехфазной обмотки

$$\begin{pmatrix} Ma^2 \\ Mb^2 \\ Mc^2 \end{pmatrix} = k\sqrt{L_{TO}L_C} \times \sum_{x=K2(n)}^{K2(n)+N2s2(n)-1} \left(\cos \left(x \frac{2\pi}{N} + \begin{pmatrix} 0 \\ 2\pi/3 \\ -2\pi/3 \end{pmatrix} + \Delta + \alpha_2 \right) \right).$$

Сумму взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО1, КО1 определяют с помощью суммы элементов $N1s1$ -размерной подматрицы матрицы **M**, первый элемент которой совпадает с первым элементом матрицы **M**, а главная диагональ удалена (за вычетом значения $-kL_C N1s1$):

$$M_{11} = -kL_C N1s1 + \sum_{i=1}^{N1s1} \sum_{j=1}^{N1s1} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{N1s1-1} \left(2x \cos \left((N1s1-x) \frac{2\pi}{N} \right) \right).$$

Сумму взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО2 КО1 рассчитывают в соответствии с суммой элементов $N1s2$ -размерной подматрицы матрицы **M**, первый элемент которой совпадает с первым элементом матрицы **M**, а главная диагональ удалена (за вычетом значения $-kL_C N1s2$):

$$M_{22} = -kL_C N1s2 + \sum_{i=1}^{N1s2} \sum_{j=1}^{N1s2} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{N1s2-1} \left(2x \cos \left((N1s2-x) \frac{2\pi}{N} \right) \right).$$

Сумму взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО1, КО2 определяют в соответствии с суммой элементов $N2s1$ -размерной подматрицы матрицы **M**, первый элемент которой совпадает с первым элементом матрицы **M**, а главная диагональ удалена (за вычетом значения $-kL_C N2s1$):

$$M^{11} = -kL_C N2s1 + \sum_{i=1}^{N2s1} \sum_{j=1}^{N2s1} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{N2s1-1} \left(2x \cos \left((N2s1-x) \frac{2\pi}{N} \right) \right).$$

Сумму взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО2, КО2 вычисляют в соответствии с суммой элементов $N2s2$ -размерной подматрицы матрицы **M**, первый элемент которой совпадает с первым элементом матрицы **M**, а главная диагональ удалена (за вычетом значения $-kL_C N2s2$):

$$M^{22} = -kL_C N2s2 + \sum_{i=1}^{N2s2} \sum_{j=1}^{N2s2} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{N2s2-1} \left(2x \cos \left((N2s2-x) \frac{2\pi}{N} \right) \right).$$

Сумму взаимоиндуктивностей между ПО1, КО1 и ПО2, КО1 находят в соответствии с суммой всех элементов матрицы **M**, первый элемент которой совпадает с первым элементом матрицы **M** размерностью $N1s2 \times N1s2$:

$$M_{12} = \sum_{i=1+N1s_1}^N \sum_{j=1}^{N1s_1} M_{i,j} = \\ = kL_C \sum_{x=1}^{N1s_1-1} \left(\sum_{y=1}^{N1s_2-1} \cos \left((x+y-1) \frac{2\pi}{N} \right) \right).$$

Сумму взаимоиндуктивностей между ПО1, КО2 и ПО2, КО2 получают в соответствии с суммой всех элементов подматрицы матрицы \mathbf{M} (1), первый элемент которой стоит на пересечении первого столбца и Ns_1 -й строки и имеющей размер $N2s_2$ строк на $N2s_1$ столбцов:

$$M^{12} = \sum_{i=1+N2s_1}^N \sum_{j=1}^{N2s_1} M_{i,j} = \\ = kL_C \sum_{x=1}^{N2s_1-1} \left(\sum_{y=1}^{N2s_2-1} \cos \left((x+y-1) \frac{2\pi}{N} \right) \right).$$

Согласно рис. 1, сумма взаимоиндуктивностей M_{11}^1 между всеми секциями ПО1, КО1 и ПО1, КО2 будет определяться суммой всех элементов подматрицы Ψs_1^1 размерностью $N1s_1 \times N2s_1$; между всеми секциями ПО1, КО1 и ПО2, КО2 — суммой всех элементов подматрицы Ψs_1^2 размерностью $N1s_1 \times N2s_2$; сумма взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО2, КО1 и ПО1, КО2 — суммой всех элементов подматрицы Ψs_2^1 размерностью $N1s_2 \times N2s_1$; сумма взаимоиндуктивностей между всеми секциями ПО2, КО1 и ПО2, КО2 — суммой всех элементов подматрицы Ψs_2^2 размерностью $N1s_2 \times N2s_2$.

Полученные выражения позволяют моделировать процесс работы УВ с ТВМП с двумя круговыми обмотками при различных способах управления, отличающихся коммутационным разделением круговых обмоток на полуобмотки с разным количественным соотношением числа секций в каждой из них на произвольном коммутационном интервале.

Таким образом, использование матрицы Теплица при описании электромагнитных процессов в УВ с ТВМП с двумя круговыми обмотками позволяет существенно упростить составление дифференциальных уравнений, снизить их количество до восьми, что дает возможность создавать математические и схемотехнические модели с детерминированной структурой для различного числа секций и произвольных алгоритмов управления и, таким образом, обеспечить параметризацию моделирования.

Литература

1. Пат. 2525298 РФ. Трансформатор с трехфазной и круговой обмотками / И.Ю. Кузьмин и др. // Бюл. изобрет. 2014. № 22.
2. Черевко А.И. Полупроводниковые преобразователи автономных электроустановок с трансформатора-

ми вращающегося магнитного поля, обладающие высоким качеством выходного напряжения. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. ун-та, 2005.

3. Пат. 2534218 РФ. Многофазный трансформатор / А.А. Сеньков, А.П. Сеньков, А.Н. Калмыков // Бюл. изобрет. 2014. № 33.

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

5. Музыка М.М. Совершенствование полупроводниковых преобразователей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями в судовых электротехнических системах: дисс. ... канд. техн. наук. Северодвинск, 2008. С. 93—107.

6. Черевко А.И., Базанов В.А., Музыка М.М. Системы управления полупроводниковыми преобразователями, выполненными на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями. Северодвинск: Севмашвуз, 2005.

7. Музыка М.М. и др. Алгоритмы работы силовых ключей в составе коммутаторов управляемых выпрямителей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями // Инновационное развитие северных территорий России: образование, наука, производство: Сб. докл. на науч.-практ. конф. Северодвинск, 2010. С. 106—113.

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

9. 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.

10. Пат. 2586322 РФ. Способ регулирования выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем с четным числом секций круговой обмотки / И.А. Сакович и др. // Бюл. изобрет. 2016. № 18.

11. Лимонникова Е.В. Математическое и физическое моделирование полупроводниковых выпрямителей на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем в судовых электротехнических комплексах: дисс... канд. техн. наук. Северодвинск, 2007.

12. Сингаевский Н.А., Суртаев Н.А. Математическая модель ТВП в системе MATLAB // Технические и технологические системы: Материалы междунар. науч. конф. Краснодар: КубГАУ, 2009. С. 103—107.

13. Сакович И.А., Черевко А.И., Лимонникова Е.В. Математическое моделирование управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. № 3 (37). С. 192—200.

References

1. **Pat. 2525298 RF.** Transformator s Trekhfaznoy i Krugovoy Obmotkami. I.Yu. Kuz'min i dr. Byul. Izobret. 2014;22. (in Russian).

2. **Cherevko A.I.** Poluprovodnikovye Preobrazovateli Avtonomnyh Elektroustanovok s Transformatorami Vrashchayushchegosya Magnitnogo Polyа, Obladayushchie Vysokim Kachestvom Vyhodnogo Napryazheniya. Arhangel'sk: Izd-vo Arhangel'skogo Gos. Un-tа, 2005. (in Russian).

3. **Pat. 2534218 RF.** Mnogofaznyy Transformator. A.A. Sen'kov, A.P. Sen'kov, A.N. Kalmykov. Byul. Izobret. 2014;33. (in Russian).

4. **Grigorash O.V., Otmahov G.S.** Vypryamiteli na Transformatorah s Vrashchayushchimsya Magnitnym Polem. Nauchnyy Zhurnal KubGAU. 2014;98:560—570. (in Russian).

5. **Muzyka M.M.** Sovershenstvovanie Poluprovodnikovyyh Preobrazovateley s Transformatorami s Vrashchayushchimsya Magnitnymi Polyami v Sudovyh Elektrotekhnicheskikh Sistemah: Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. Severodvinsk, 2008:93—107. (in Russian).

6. **Cherevko A.I., Bazanov V.A., Muzyka M.M.** Sistemy Upravleniya Poluprovodnikovymi Preobrazovatelyami, Vypolnennymi na Baze Transformatorov s Vrashchayushchimsya Magnitnymi Polyami. Severodvinsk, Sevmashvtuz, 2005. (in Russian).

7. **Muzyka M.M. i dr.** Algoritmy Raboty Silovyh Klyuchey v Sostave Kommutatorov Upravlyaemyh Vypryamiteley s Transformatorami Vrashchayushchimsya Magnitnymi Polyami. Innovatsionnoe Razvitie Severnyh Territoriy Rossii: Obrazovanie, Nauka, Proizvodstvo: Sb. Dokl. na Nauch.-prakt. Konf. Severodvinsk, 2010:106—113. (in Russian).

8. **Platonenkov S.V.** Stupenchato-hordovyy Algoritm Upravleniya Vypryamitelem, Postroennym na Baze Transformatora s Vrashchayushchimsya Magnitnym Polem. Vzglyad v Budushchee – 2015: Materialy XIII Molodezhnoy Nauch.-tekhn. Konf. SPb.: OAO TSKB MT Rubin, 2015:453—459. (in Russian).

9. **Sakovich I.A., Cherevko A.I., Platonenkov S.V.** Kachestvo Vyhodnogo Napryazheniya Upravlyaemogo Vypryamitelya na Baze Transformatora s Vrashchayushchimsya Magnitnym Polem. Elektrichestvo. 2016;1:43—49. (in Russian).

10. **Pat. 2586322 RF.** Sposob Regulirovaniya Vyhodnogo Napryazheniya Upravlyaemogo Vypryamitelya na Baze Transformatora s Vrashchayushchimsya Magnitnym Polem s Chetnym Chislom Sektsiy Krugovoy Obmotki. I.A. Sakovich i dr. Byul. Izobret. 2016;18. (in Russian).

11. **Limonnikova E.V.** Matematicheskoe i Fizicheskoe Modelirovanie Poluprovodnikovyyh Vypryamiteley na Baze Transformatora s Vrashchayushchimsya Magnitnym Polem v Sudovyh Elektrotekhnicheskikh Kompleksah: Diss... Kand. Tekhn. Nauk. Severodvinsk, 2007. (in Russian).

12. **Singaevskiy N.A., Surtaev N.A.** Matematicheskaya model' TVP v Sisteme MATLAB. Tekhnicheskie i Tekhnologicheskije Sistemy: Materialy Mezhdunar. Nauch. Konf. Krasnodar: KubGAU, 2009:103—107. (in Russian).

13. **Sakovich I.A., Cherevko A.I., Limonnikova E.V.** Matematicheskoe Modelirovanie Upravlyaemyh Vypryamiteley, Postroennyh na Baze Transformatorov s Vrashchayushchimsya Magnitnym Polem. Vestnik Gos. Un-tа Morskogo i Rechnogo Flota im. Admirala S.O. Makarova. 2016;3 (37):192—200. (in Russian).

Сведения об авторах

Сакович Игорь Александрович — руководитель группы разработки и внедрения информационных технологий ЗАО «Биус», e-mail: igorsakovitch@gmail.com

Черевко Александр Иванович — доктор технических наук, заведующий кафедрой судовой электроэнергетики и электротехники Института судостроения и морской арктической техники филиала Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова в г. Северодвинске, e-mail: cherevko-ai@mail.ru

Кузьмин Илья Юрьевич — инженер-конструктор 2 категории проектно-конструкторского отдела АО «СПО «Арктика», e-mail: firebrand001@gmail.com

Information about authors

Sakovich Igor A. — Team Leader in the Development and Implementation of Information Technologies JSC «BIUS», e-mail: igorsakovitch@gmail.com

Cherevko Aleksandr I. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Ship Power And Electrical Engineering Dept., Institute of Shipbuilding and Maritime Arctic Engineering branch of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov in Severodvinsk, e-mail: cherevko-ai@mail.ru

Kuz'min Ilya Yu. — Design Engineer 2 Category of the Design Dept., JSC «SPO «Arctic», e-mail: firebrand001@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26.11.2016