

УДК 621.316.722

В.В. Юдин, С.В. Маврин**МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С КОММУТАЦИЕЙ ВТОРИЧНЫХ ОБМОТОК***Использован метод объединенных матриц для получения совокупности выходных напряжений для двухтрансформаторного регулятора переменного напряжения с коммутацией вторичных обмоток.***Ключевые слова:** матрица, модель, регулятор, трансформатор.

Введение. Наиболее простым способом регулирования переменного напряжения является способ изменения фазового угла открытия тиристора, характеризующийся значительным уровнем искажений формы напряжения. Гораздо меньшими искажениями характеризуются трансформаторно-ключевые регулируемые элементы (ТКРЭ)[1].

Но анализ электромагнитных схем представляет собой достаточно трудоемкую задачу. Задача еще более усложняется при наличии в составе схемы ключевых структур, подключающих или исключающих те или иные цепи из общей схемы. Наибольшую сложность при исследовании дискретно регулируемых элементов представляет собой анализ процессов в ТКРЭ[1,2], требующий совместного решения уравнений, составленных на основании закона электромагнитной индукции, закона полного тока и законов Кирхгофа для электрической и магнитной цепей, что представляет собой сложную задачу. Ранее была рассмотрена однотрансформаторная модель ТКРЭ [4]. На практике получили применение многотрансформаторные схемы, которые применяются для регулирования больших мощностей и позволяют получить широкий диапазон регулирования.

Основная часть. Для анализа ТКРЭ наиболее эффективным является применение метода объединенных матриц (МОМ)[3]. Сущность его заключается в следующем. Соответствующую исследуемому устройству электромагнитную цепь (ЭМЦ) преобразовывают в эквивалентную ей электрическую цепь (ЭЦ) той же конфигурации, что ЭЦ исходной ЭМЦ, но с другими сопротивлениями. При этом влияние магнитной цепи (МЦ) исходной ЭМЦ на происходящие в ней процессы учитывается введением в эквива-

лентную ЭЦ дополнительных сопротивлений, зависящих от свойств исходной ЭМЦ.

Исходными данными для выполнения анализа являются совокупность матриц, описывающих топологические свойства цепей, характеристики элементов цепей и воздействий. Топологические свойства ЭЦ и МЦ опишем контурно-ветвевыми матрицами Γ_{EE} и Γ_{VV} размерности $(n_K * n_B)$ и $(m_K * m_B)$, строкам которых соответствуют элементы множества контуров, а столбцам - элементы множества ветвей соответствующих цепей.

Для установления связи между ЭЦ и МЦ вводятся матрицы электромагнитной W_{EM} и магнитоэлектрической ветвевой связи размерности (n_B, m_B) и (m_B, n_B) соответственно. На пересечении k -й строки и l -го столбца матрицы W_{EM} записывают число витков w_{kl} обмотки, включенной в k -ю ветвь ЭЦ и размещенной на l -м стержне МЦ, взятое со знаком, соответствующим направлению её намотки. Если k -я строка ЭЦ не связана с l -м стержнем МЦ, на пересечении строки и столбца записывают 0.

Матрицу W_{ME} составляют аналогичным образом. При этом между матрицами W_{ME} и W_{EM} существует соотношение:

$$W_{ME} = W_{EM}^T,$$

где W_{EM}^T - транспонированная матрица W_{EM}

Электрические и магнитные свойства ЭМЦ зададим матрицей сопротивления ветвей ЭЦ:

$$Z_B^E = \text{diag}(Z_{B1}^E, Z_{B2}^E, \dots, Z_{BnB}^E),$$

и матрицей сопротивления ветвей МЦ:

$$Z_B^M = \text{diag}(Z_{B1}^M, Z_{B2}^M, \dots, Z_{BmB}^M),$$

где Z_{Bk} -сопротивление k -й ветви ЭЦ ($k=1,2, \dots, n_B$), Z_{Bl} -сопротивление l -й ветви МЦ ($l=1,2, \dots, m_B$).

Воздействие на ЭЦ зададим матрицей комплексных или операторных ЭДС ветвей:

$$E_B = \begin{bmatrix} E_{B1} \\ E_{B2} \\ \dots \\ E_{Bn} \end{bmatrix},$$

где E_{Bk} ($k = 1, 2, \dots, n$) - эдс, действующая в k -й ветви ЭЦ.

В соответствии с методом объединенных матриц для ЭМЦ справедлива следующая система матричных уравнений:

$$\begin{aligned} E_K &= Z_K^E I_K + Z_K^{EM} \Phi_K, \\ 0 &= Z_K^{ME} I_K + Z_K^M \Phi_K, \end{aligned} \quad (1)$$

в которых отражена связь контурных величин (эдс E_K , токов I_K и потоков Φ_K) с контурными параметрами ЭМЦ (сопротивлениями ЭЦ Z_K^E , сопротивлениями МЦ Z_K^M , сопротивлениями электромагнитной и магнитоэлектрической связи Z_K^{EM} и Z_K^{ME}). При этом имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} Z_K^E &= \Gamma_{EE} Z_B^E \Gamma_{EE}^T, \\ Z_K^{EM} &= p \Gamma_{EE} W_{EM} \Gamma_{MM}^T, \\ Z_K^{ME} &= -\Gamma_{MM} W_{ME} \Gamma_{EE}^T, \\ Z_K^M &= \Gamma_{MM} Z_B^M \Gamma_{MM}^T, \\ E_K &= \Gamma_{EE} E_B, \\ I_B &= \Gamma_{EE}^T I_K, \\ \Phi_B &= \Gamma_{EE}^T \Phi_K, \end{aligned} \quad (2)$$

где p – оператор дифференцирования.

При анализе гармонического процесса (питании регулятора от гармонической сети с циклической частотой f) все параметры, а также исходные данные и расчетные величины являются комплексными. Оператор дифференцирования заменяется множителем

$$p = j\omega = j2\pi f.$$

Из (1) и (2) следует

$$I_B = \Gamma_{EE}^T Y_K^E E_K = \Gamma_{EE}^T \left[Z_K^E - Z_K^{EM} (Z_K^M)^{-1} Z_K^{ME} \right]^{-1} E_K.$$

Для несложных схем можно не прибегать к построению электромагнитной цепи и топологических моделей ЭЦ и МЦ, осуществляя определение матриц непосредственно по схеме ТКРЭ. Естественно, при этом следует учитывать то обстоятельство, что ключи являются регулируемые элементами, и их сопротивления зависят от компонентов управляющего кода, а каждая из секций обмоток обладает активным сопротивлением. Индуктивные и взаимные сопротивления при использовании метода объединенных

матриц учитываются автоматически посредством введения матрицы ветвевой электромагнитной связи. Потому специально в ЭЦ они не вводятся.

Сложность модели определяется количеством компонентов и топологическими особенностями ЭЦ и МЦ. Структурные особенности сформированных матриц зависят от принятой нумерации контуров и ветвей ЭЦ и МЦ. Удачная нумерация позволяет выделить в матрицах определенные блоки, имеющие конкретный физический смысл. При этом появляется возможность получения универсальных блочных матриц, независящих от размерности исследуемых цепей.

Рассмотрим процесс создания топологических моделей ТКРЭ на примере двухтрансформаторного ТКРЭ. Регулирование напряжения на нагрузке в таком регуляторе осуществляется изменением состояния ключей $K1, K2, \dots, K8$ под действием управляющего кода $Y = [y_1, y_2, \dots, y_8]$.

Регулятор осуществляет разделение нерегулируемой и регулируемой мощностей и вынос ключей из цепи силового тока, что облегчает решение задачи получения больших мощностей регулирования. Такой регулятор удобно использовать в стабилизаторах напряжения сети. Он обеспечивает широкодиапазонное регулирование с равномерным изменением выходного напряжения. Обмотка трансформатора Т1 разделена на 5 одинаковых секций, так что при напряжении сети 220 В на каждую секцию приходится 44 В. Первичная обмотка трансформатора Т2 рассчитана на 220 В, вторичная, включенная в сеть силового тока, - на 33 В. Регулятор имеет 11 ступеней регулирования в диапазоне 187...253 В.

В качестве ключей в приведенном регуляторе используют симисторы КУ208Г, для которых максимальное напряжение в закрытом состоянии составляет 400 В, а максимальный ток через симистор в открытом состоянии – 5 А. Отсюда следует, что максимальный ток в выходной цепи равен 33 А. Фактическое значение мощности регулятора определяется расчетной мощностью трансформаторов Т1 и Т2. При мощностях этих трансформаторов 10 ВА, 100 ВА, 400 ВА и 900 ВА мощность регулятора составляет соответственно 0,064 кВА, 0,64 кВА, 2,64 кВА и 5,94 кВА.

Выполним индексацию, воспользовавшись для ветвей ЭЦ буквами латинского алфавита, а для ветвей МЦ – арабскими цифрами. После определения положительных направлений ветвей ЭЦ и МЦ схема ТКРЭ приобретет вид, изображенный на рисунке 1.

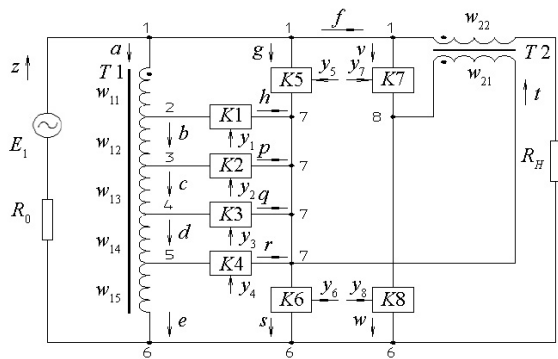


Рисунок 1 – Схема ТКРЭ с индексированными ветвями

Для удобства при определении элементов матриц большой размерности в этом примере и в дальнейшем будем использовать табличный способ их задания. Каждый элемент матрицы будем определять с помощью принятой системы индексации как соответствующий элемент таблицы. В рассматриваемом примере матрицу ветвевой электромагнитной связи зададим таблицей 1.

Таблица 1

Матрица	Обмотки		Ветви ЭЦ
	1	2	
W_{EM}	w_{11}	0	1
	w_{12}	0	2
	w_{13}	0	3
	w_{14}	0	4
	w_{15}	0	5
	0	w_{21}	6
	0	0	7
	0	0	8
	0	0	9
	0	0	10
	0	0	11
	0	0	12
	0	w_{22}	13
	0	0	14
	0	0	15
	0	0	16

Соответствующая этой схеме электромагнитная цепь изображена на рисунке 2.

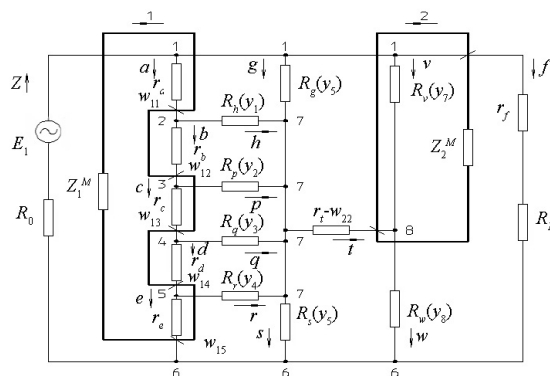


Рисунок 2 – Электромагнитная цепь ТКРЭ

На рисунке 3 изображены топологические модели модели ЭЦ и МЦ.

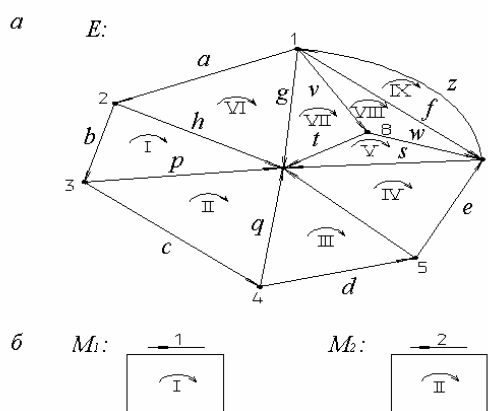


Рисунок 3 – Топологические модели электрической (а) и магнитной (б) цепей

В соответствии с принятыми направлениями обхода контуров с помощью таблиц 2 и 3 определим контурно-ветвевые матрицы ЭЦ и МЦ.

Таблица 2

Γ_{EE}^T									Матрица		
0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	a	Ветви
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	b	
0	0	0	0	0	0	0	-1	0	3	c	
0	0	0	0	0	0	-1	0	0	4	d	
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	5	e	
-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	6	f	
0	0	-1	+1	0	0	+1	0	0	7	g	
0	0	0	-1	0	0	0	0	+1	8	h	
0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	9	p	
0	0	0	0	0	0	0	-1	0	10	q	
0	0	0	0	0	+1	-1	0	0	11	r	
0	0	0	0	+1	+1	0	0	0	12	s	
0	0	+1	0	-1	0	0	0	0	13	t	
0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	14	v	
0	-1	0	0	+1	0	0	0	0	15	w	
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	16	z	

Окончание таблицы 2

9	8	7	6	5	4	3	2	1	№	Контуры
IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I	Обозначение	

Таблица 3

Матрица	Ветви		Контуры	
	Γ_{MM}	a	b	Номера
1		2		
-1 0		1	I	
0 -1		2	II	

Результатом вычислений является совокупность выходных напряжений, зависящих от параметров управляющего кода.

Заключение. Применение MOM позволит формализовать задачу анализа ТКРЭ, что существенно облегчает процесс их исследования, снижает вероятность ошибок в составлении исходной модели исследования. Использование данного метода позволяет увеличить адекватность при анализе прецизионных регуляторов напряжения.

Библиографический список

1. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Киев: Наукова думка, 1983. – 216 с.
2. Миловзоров В.П., Мусолин А.К. Дискретные стабилизаторы и формирователи напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248с.
3. Юдин В.В. Расчет линейных электромагнитных цепей методом объединенных матриц. // Электричество №7, 1977. – С. 63 – 87.
4. Иристу Й.А., Юдин А.В. Блочная модель регулятора переменного напряжения с коммутацией вторичных обмоток // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Рязань. – 2008. – С. 127-130.

