УДК 62-97/98

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕНТИЛЬНОМ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ С ШЕСТИФАЗНОЙ НУЛЕВОЙ СХЕМОЙ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

© 2022 А.В. Данеев[1], Р.А. Данеев[2], В.Н. Сизых[1]

[1] Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия
[2] Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск Иркутск, Россия

Статья поступила в редакцию 08.02.2022

В статье ставится и решается задача разработки универсальной имитационной модели шестифазного магнитоэлектрического генератора (МЭГ) с однополупериодным выпрямителем на базе методики математического моделирования, учитывающей рациональную форму представления уравнений вентильного генератора (ВГ) и оптимальную, с точки зрения затрат машинного времени, организацию вычислительных процедур. В основу математического описания вентильного МЭГ положен метод представления уравнений модели в однородном координатном базисе переменных, позволяющий описать электромагнитные процессы ВГ системой дифференциальных уравнений (ДУ) минимального (по числу независимых контуров цепи - хорд дерева направленного графа) порядка. Предпочтение данному методу отдается вследствие того, что силовая структура исследуемого ВГ не содержит емкостных элементов.

Ключевые слова: численный анализ, переходные процессы, вентильный магнитоэлектрический генератор, шестифазная нулевая схема выпрямления.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-67-78

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время работы, в которых бы рассматривались вопросы матрично-топологического описания и численного анализа на ЭВМ процессов многофазного синхронного генератора (СГ) с однополупериодным выпрямителем в фазных координатах, практически отсутствуют [1].

В данной статье ставится и решается задача разработки универсальной имитационной модели шестифазного магнитоэлектрического генератора (МЭГ) с однополупериодным выпрямителем на базе методики математического моделирования, учитывающей рациональную форму представления уравнений вентильного генератора (ВГ) и оптимальную, с точки зрения затрат машинного времени, организацию вычислительных процедур.

В основу математического описания вентильного МЭГ положен метод представления уравнений модели в однородном координатном базисе переменных, позволяющий описать электромагнитные процессы ВГ системой дифференциальных уравнений (ДУ) минимального (по числу независимых контуров цепи - хорд дерева направленного графа) порядка. Предпочтение данному методу отдается вследствие того, что силовая структура исследуемого ВГ не содержит емкостных элементов.

1. ДОПУЩЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Электрическая схема замещения вентильного МЭГ и нагрузки - последовательно включенными индуктивностью фильтра и активным сопротивлением - показана на рис 1. Там же указан принятый порядок чередования фаз обмотки МЭГ, согласно которому симметричная статорная обмотка шестифазного генератора рассматривается как две трехфазные «обмотки» с угловым сдвигом в 60 эл. град. Такая разметка фаз удобна с точки зрения упорядоченного формирования блочной матрицы индуктивностей и взаимных индуктивностей статорных и роторных контуров МЭГ [2].

На рис. 1 параметры, характеризующие магнитосвязанные контуры МЭГ, входят в обобщенный вектор э.д.с. e. Вентили представляются в общем случае нелинейными полными сопротивлениями $Z_1, \ldots, Z_6$. Конкретный вид ветвей с вентилями задается исходя из выбранной при исследованиях модели полупроводниковых элементов. На начальном этапе составления математического описания ВГ модель вентиля не конкретизируется. Исходные расчетные данные, параметры МЭГ и вентильного звена приведены в табл. 1.

Данеев Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации». E-mail: daneev@mail.ru
Данеев Роман Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий.
E-mail: romasun@mail.ru
Сизых Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Ав-томатизация производственных процессов». E-mail: sizykh_vn@mail.ru

Для упрощения анализа электромагнитных процессов ВГ сделаны общепринятые допущения:

- постоянный магнит (ПМ) представляется безынерционным одновитковым контуром с включенным в него источником тока;
- не учитываются демпфирующие свойства ПМ и биметаллической обоймы ротора коллекторного типа;
- магнитная система считается ненасыщенной.

Первое допущение обосновано в [3] и фактически означает, что возбуждение ВГ осуществляется от стабилизированного источника м. д. с.

Второе допущение является общепринятым [4], так как демпфирующие свойства магнитной системы СГ проявляются слабо и не оказывает существенного влияния на электромагнитные процессы. Длительность переходных процессов в исследуемом ВГ невелика, так как система возбуждения МЭГ малоинерционна, а индуктивные сопротивления обмоток, характеризующие реакцию якоря генератора, на 2-3 порядка меньше соответствующих параметров СГ с электромагнитным возбуждением.

Третье допущение связано со специфическим проявлением продольной реакции якоря, вызванным наличием контура ПМ [3].

Выделим основные принципы рациональной методики, положенные в основу разработки математических моделей (ММ) ВГ:

- используемся метод моделирования с постоянной структурой уравнений цепи, т.е. изменяются не уравнения модели, а параметры нелинейных элементов-вентилей;
- возможен выбор любой известной модели вентилей;
- применяется характерный для метода диакоптики [5] прием упорядоченного разбиения системы на две части; нелинейную часть, характеризующую вентильное звено, и линейную часть, определяющую подсистемы и элементы одного функционального назначения и с одинаковым составом параметров;
- применяется матрично-топологический подход к формированию уравнений состояния, записанных в однородном координатном базисе, т.е. независимые переменные (переменные состояния) - токи ветвей с индуктивными элементами [6-7];
- рекомендуется формировать основные блоки модели ВГ с учетом необходимости реализации системных методов численного интегрирования жестких систем уравнений [8], учитывая специфику параметров ВГ (табл. 1): повышенная частота переменного тока, малые значения индуктивностей, практически скачкообразные изменения проводимостей вентилей во время коммутаций.

Таблица 1

Основные расчетные данные и параметры ВГ		Числовые значения параметров	
		в физических единицах	в относительных единицах
Исходная мощность -		18 кВ·А	-
Частота вращения -		8000 об/мин	-
Число полюсов – 2p		16	-
Амплитудное значение напряжения фазы - $E_{\varphi m}$		40,3 в	1
Сопротивление фазы генератора при t=20°C - R_{φ}		$4{,}2\cdot10^{-2}$ Ом	$7{,}754\cdot10^{-2}$
Индуктивность рассеяния фазы L		$1{,}6\cdot10^{-6}$ Гн	$1{,}98\cdot10^{-2}$
Индуктивность реакции якоря по продольной оси - L		$2{,}2\cdot10^{-6}$ Гн	$2{,}723\cdot10^{-2}$
Индуктивность реакции якоря по поперечной оси - L		$2{,}5\cdot10^{-6}$ Гн	$3{,}094\cdot10^{-2}$
Параметры диода Д4 171-320	$R_{V\,пр}$	$2{,}5\cdot10^{-3}$ Ом	$8{,}16\cdot10^{-2}$
	$R_{V\,обр}$	$2{,}0\cdot10^{4}$ Ом	$3{,}69\cdot10^{4}$
Номинальное среднее значение выпрямленного напряжения – U		28,5 В	-
Угловая скорость вращения поля ротора - ω_{min}		6697,88 $с^{-1}$	1
Базисное напряжение - U		40,3 В	-
Базисный ток - I		74,43 А	-
Базисное время - t		$1{,}493\cdot10^{-4}$ с	-
Базисное сопротивление нагрузки - Z		0,5416 Ом	-

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Формирование математической модели ВГ в виде нелинейных дифференциальных уравнений состояния минимального порядка включает два этапа:

- составление универсального матричного уравнения по методу контурных токов, отражающего в общем виде топологию цепи в однородном координатном базисе;

- получение матричного дифференциального уравнения состояния в нормальной форме, учитывающего уравнения математических моделей генератора и нелинейного вентильного звена.

Порядок составления матричного уравнения цепи (рис. 1) сводится к следующему:

1. Строится направленный связный граф (рис. 2), вид которого определяется структурой исходной схемы замещения ВГ (рис. 1). Положительные направления ребер графа соответствуют условным положительным направлениям токов ветвей схемы.

2. Выбирается дерево графа (рис. 3), причем так, чтобы максимально возможное число вентилей относилось к хордам (связям) дерева. Дерево на рис. 3 имеет 6 пронумерованных в порядке возрастания хорд (ветвей с вентилями) и одно ребро (ветвь нагрузки). Как известно число хорд определяет число независимых контуров и, следовательно, минимальное число уравнений для контурных токов:

$$m=p-(q-1),$$

где p = 7 – число ветвей цепи (ребер графа);

q = 2 – число узлов цепи (вершин графа).

В рассматриваемом примере число фаз МЭГ и число независимых уравнений состояния совпадают.

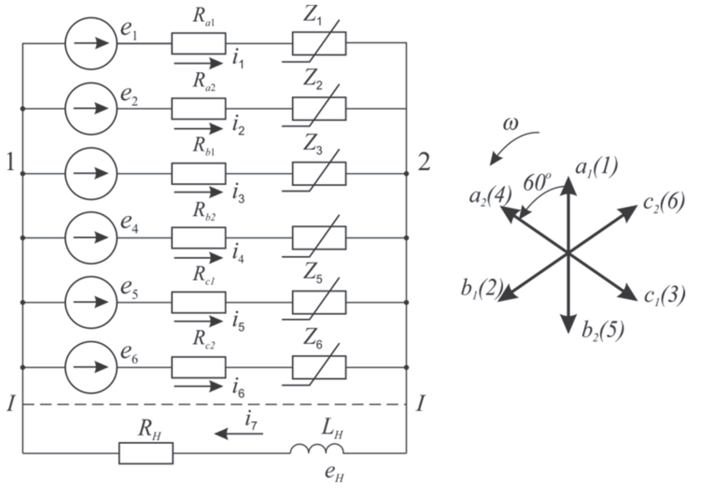

Рис. 1. Схема замещения вентильного МЭГ и разметки его фаз

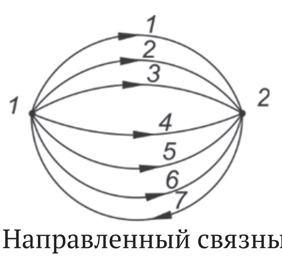

Рис. 2. Направленный связный граф

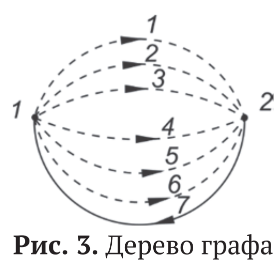

Рис. 3. Дерево графа

ветви (ребра) Vp | Hp

контуры (хорды) Vx - Гх

N	1	2	3	4	5	6	7
1	1						1
2		1					1
3			1				1
4				1			1
5					1		1
6						1	1

E K

ветви (ребра)

узлы (вершины)

N	1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1

$-K^T$ E

Рис. 4. Контурная матрица B и матрица соединений A

3. Формируются матрица сечений **A** и контурная матрица B (рис.4), входящие в матрично-топологические уравнения, составленные по законам Кирхгофа:

$$\left.\begin{aligned} AI &= 0, \quad (1)\\ BU &= 0, \quad (2)\\ I &= B^T I_K, \quad (3)\\ U &= e - ZI \quad (4)\end{aligned}\right\}$$

Здесь *I, U, e* – векторы токов, напряжений, э.д.с. ветвей соответственно, размерностью p × 1;

I_K - вектор токов контуров (хорд) размерностью $m \times 1$;

Z - диагональная матрица сопротивлений ветвей размерностью $p \times p$.

При составлении матрицы B направление обхода контуров и их нумерация соответствуют направлениям и нумерации хорд дерева графа. При составлении матрицы A с положительным знаком берутся токи, направленные к узлам.

Такой порядок составления матриц A и B (рис. 4) позволяет всегда представлять их в виде блочных, т.е.

$$B = [E \vdots K]; \qquad A = [-K^T \vdots E], \qquad (5)$$

где E – единичная матрица соответствующей размерности;

K – фундаментальная матрица контуров (ФМК) размерностью $m \times (p-m)$.

Для рассматриваемого МЭГ с однополупериодным выпрямителем все ветви, содержащие вентили, входят в хорды дерева графа. Кроме того, нет необходимости раздельного представления структур МЭГ и вентильного звена, т.к. ветви данных структур соединены последовательно, а фазные токи генератора одновременно являются и токами вентилей. Это обстоятельство отражено в структуре ФМК, строки которой относятся к обобщенным ветвям (хордам) вентильного звена – V_X и генератора – Γ_X (рис. 4). Очевидно, что разделение схемы на нелинейную и линейные части происходит по принадлежащему дереву графа ребру (ветви) нагрузки – H_P (сечение I - I на рис. 1). Это обстоятельство подчеркивается также блочными матрицами A и B в (5).

При формировании вектора э.д.с. ветвей падение напряжения на индуктивности фильтра L_H (рис. 1) заменяем э.д.с.

$$e_H = -L_H \frac{di_H}{dt}, \text{т.е.}$$

$$e = [e_1, e_2, \ldots, e_6, e_H]^T. \qquad (6)$$

4. Составляется матрично-топологическое уравнение цепи (рис. 1) по методу контурных токов с использованием уравнений (1-4). При этом все матрицы и векторы необходимо представить в виде блочных, разделив их элементы по принадлежности к хордам (x) и ребрам (p) дерева графа (рис. 3). Такое разбиение позволяет в дальнейшем получить матричное дифференциальное уравнение в нормальной форме, т.е. разрешенное в явном виде относительно вектора производных переменных состояния (токов хорд).

Выполнив такое разбиение получим следующие выражения:

$$I = \begin{bmatrix} i_X \\ i_p \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} u_X \\ u_p \end{bmatrix} \quad e = \begin{bmatrix} e_X \\ e_p \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} z_X & \vdots & 0 \\ 0 & \vdots & z_p \end{bmatrix}. \qquad (7)$$

Из уравнений (1), (2) с учетом (5) и (7) имеем:

$$AI = [-K^T \vdots E] \cdot \begin{bmatrix} i_X \\ i_p \end{bmatrix} = -K^T i_X + E i_p,$$

откуда

$$i_p = K^T i_X. \qquad (8)$$

Аналогично

$$BU = [E \vdots K] \cdot \begin{bmatrix} u_X \\ u_p \end{bmatrix} = E u_X + K u_p = 0,$$

откуда

$$u_X = -K u_p = K e_p. \qquad (9)$$

Уравнения (8), (9) характеризуют связь токов ребер и хорд, а также напряжений ребер и хорд посредством ФМК. Это обстоятельство позволяет выражать зависимые переменные через независимые. Подставив в уравнение (2) напряжение обобщенной ветви (4), получим с учетом (3):

$$Be = BZB^T I_K.$$

В блочном представлении, учитывая, что $I_K = i_X$, а $e_p = e_H$ и $Z_p = R_H$ имеем:

$$[E \vdots K] \cdot \begin{bmatrix} e_X \\ e_H \end{bmatrix} = [E \vdots K] \cdot \begin{bmatrix} Z_X & 0 \\ 0 & Z_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E \\ K^T \end{bmatrix} \cdot i_X.$$

Отсюда после преобразований окончательно получим матрично-топологическое уравнение цепи (рис. 1):

$$e_X + K e_H = \left(Z_X + K R_H K^T\right) \cdot i_X. \qquad (10)$$

Полученное уравнение является основой для составления на втором этапе дифференциальных уравнений модели ВГ, учитывающих параметры генератора (вектор e_X) и параметры нелинейных вентилей - вектор

$$Z_X = Z_X(i_X) = diag\{R_{a1} + Z_1(i_1), \ldots, R_{c2} + Z_6(i_6)\}. \qquad (11)$$

Представим вектор e_X в виде:

$$e_X = -\frac{d\Psi_X}{dt} = -\frac{d}{dt}\left[L(t) \cdot i_X\right] + e_M, \qquad (12)$$

где *L(t)* – матрица индуктивностей и взаимных индуктивностей обмоток фаз МЭГ размерности $m \times m$;

$e_M = -\dfrac{d\Psi_X}{dt}$ - вектор гармонических э.д.с.

генератора, индуцируемых постоянными магнитами, размерности $m \times 1$.

Учитывая (6) и (8), а также то, что токи хорд являются одновременно и токами вентилей, т.е. $i_X = i_V$ подставим (12) в (10).

В результате после преобразований получим матричное дифференциальное уравнение состояния ВГ в канонической форме:

$$\left[L(t) + KL_H K^T\right] \cdot \frac{di_V}{dt} =$$

$$= -\left[Z_X(i_V) + \frac{dL(t)}{dt} + KR_H K^T\right] i_V + e_M. \quad (13)$$

Рассмотрим уравнение (13) при различных моделях вентилей.

Модель вентиля – «идеальный ключ»:

$$I_V = 0, \text{ если } u_V \le 0; \quad (14)$$

$$u_V = 0, \text{ если } i_V \ge 0. \quad (15)$$

Такое представление вентилей приводит к необходимости анализа, аналогичного анализу так называемых нестандартных моделей цепей [9]. При этом условию (14) соответствует стандартное значение проводимости вентилей в обратном направлении st $g_*=0$, т.е. что требует введения в левую часть уравнения (13) вектора U_V. Аналогично условию (15) соответствует стандартное значение сопротивления вентиля в прямом направлении st $R_*=0$, т.е. сопротивление вентиля в правой части уравнения (13) учитывать не нужно. Таким образом, уравнение состояния ВГ при модели вентиля – «идеальный ключ» имеет вид:

$$\left[L(t) + KL_H K^T\right] \cdot \frac{di_V}{dt} + u_V =$$

$$= -\left[R_\varphi + \frac{dL(t)}{dt} + KR_H K^T\right] \cdot i_V + e_M, \quad (16)$$

где

$$R_\varphi = diag\{R_{a1}, \ldots, R_{c2}\} -$$

матрица активных сопротивлений фаз генератора. Следует заметить, что определение вектора U_V в (16) требует разработки специальных подпрограмм, определяющих моменты коммутации.

R – модель вентиля: $Z_V = R_V(i_V)$

В этом случае уравнение состояния ВГ имеет вид:

$$\left[L(t) + KL_H K^T\right] \cdot \frac{di_V}{dt} =$$

$$= -\left[R_\varphi + R_V(i_V) + \frac{dL(t)}{dt} + KR_H K^T\right] \cdot i_V + e_M, \quad (17)$$

где

$$R_V(i_V) = diag\{R_{V1}(i_{V1}), \ldots, R_{V6}(i_{V6})\}$$

– сопротивление вентиля, которое в общем случае может определяться по его реальной вольтамперной характеристике (в.а.х.).

R-L – модель вентиля [6]:

$$Z_V(i_V) = R_V(i_V) + L_V(i_V) \times p, \quad (18)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – символ дифференцирования.

Такая модель вентиля целесообразна при разработке универсальной математической модели ВГ (с произвольной конфигурацией вентильного звена). В этом случае обеспечивается безитерационный метод учета нелинейности в.а.х. вентилей, а также повышается устойчивость решения жестких нелинейных дифференциальных уравнений ВГ. В дальнейшем принимается *R-L* модель вентилей.

В уравнении (18)

$$R_V(i_V) = \begin{cases} R_{Vпр}, \ i_V(t) \succ 0; \\ R_{Vобр}, \ i_V(t) > 0. \end{cases} \quad (19)$$

$$L_V(i_V) = \begin{cases} 0, \ i_V(t) \succ 0; \\ L_{Vобр} = \dfrac{QR_{Vобр}}{\omega}, \ i_V(t) > 0. \end{cases} \quad (20)$$

Здесь Q – добротность ветвей с вентилями, которая определяется из следующего соотношения:

$$Q = K_Q \cdot \hat{Q}, \quad (21)$$

где

$$\hat{Q} = \frac{\omega l_0}{R\phi_j}, \quad j = \overline{1, m}$$

- добротность обмотки фаз статора генератора;

ω - угловая частота;

$l_0 = \frac{L_{md} + L_{mq}}{2}$ – индуктивность, характеризующая индуктивные параметры обмотки статора [2];

$R\phi_j$ – активное сопротивление j-ой фазы ВГ;

K_Q – настроечный коэффициент, обеспечивающий минимум невязки $\varepsilon = Q - K_Q \cdot \hat{Q}$ на этапе отладки моделирующей программы.

Он выбирается из условия соответствия границ сопряжения «верхушек» синусоид выпрямленного напряжения углам, равным при режиме холостого хода ВГ.

Здесь $N_П$ – число пульсаций за период;

$L = 1, 2, \ldots$

Для ВГ с параметрами, приведенными в табл. 1, $K_Q = 0{,}7 – 1$.

В случае R-L - модели вентилей матричное уравнение состояния ВГ (13) приводится к виду:

$$\left[L(t)+L_V\left(i_V\right)+KL_H K^T\right]\cdot\frac{di_V}{dt}=$$

$$=-\left[R_\varphi+R_V\left(i_V\right)+\frac{dL(t)}{dt}+KR_H K^T\right]\cdot i_V+e_M\,, \quad (22)$$

С учетом (8) топологическое уравнение связи тока нагрузки с токами вентилей имеет вид:

$$i_H = K^T i_V, \quad (23)$$

а уравнение напряжения на нагрузке –

$$u_H = L_H K^T\frac{di_V}{dt}+R_H i_H\,. \quad (24)$$

Преобразуем матричное нелинейное уравнение (22) к нормальной системе кусочно-линейных уравнений, инвариантных на шаге интегрирования к выбранным переменным состояния - токам вентилей. Если время t относится к интервалу времени $t_И$ между соседними коммутациями вентилей (межкоммутационный интервал)

$$t_И = t_{S+1}-t_S=\frac{2\pi}{\omega N_n},$$

т.е. $t_S<t<t_{S+1}$, то обозначив вектор тока вентилей на этом интервале i_V^*, получим:

$$\frac{di_V}{dt}=A\left(i_V^*,t\right)\cdot i_V^*+B\left(i_V^*,t\right)\cdot e_{MK}\,, \quad (25)$$

где

$$A\left(i_V^*,t\right)=-\left[L_K+L_V\left(i_V^*\right)+KL_H K^T\right]^{-1}\cdot$$

$$\cdot\left[R_\phi+R_V\left(i_V^*\right)+\left(\frac{dL(t)}{dt}\right)_{t=t_K}+KR_H K^T\right];$$

$$B\left(i_V^*,t\right)=\left[L_K+L_V\left(i_V^*\right)+KL_H K^T\right]^{-1};$$

$$e_{MK}=e_M\left(t_K\right),\quad t_K<t\le t_{K+1},$$

$$L_K=L\left(t_K\right),\quad t_K<t\le t_{K+1}$$

кусочно-постоянные на К-ом интервале интегрирования вектор э.д.с., индукцируемых постоянными магнитами, и матрица индуктивностей и взаимноиндуктивностей фаз МЭГ.

С целью обоснования выбора метода численного интегрирования исследуем уравнение (25) на жесткость [7]. Число обусловленности матрицы А на К-ом интервале интегрирования определяется по формуле

$$k\left(A_K\right)=\left\|A_K\right\|\cdot\left\|A_K^{-1}\right\|,$$

где

$$\left\|A_K\right\|=\left\|A\left(i_V^*\left(t_K\right),t_K\right)\right\|=\left(\sum_{j=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\left|a_{jl}\right|_K^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

эвклидова норма матрицы A_K;

$$\left\|A_K^{-1}\right\|=\left\|A^{-1}\left(i_V^*\left(t_K\right),t_K\right)\right\|$$

эвклидова норма матрицы A_K^{-1}

Условие жесткости системы определяется на К-ом интервале коэффициентом жесткости [8]:

$$K_{ЖИ}=\frac{t_И}{\tau_{ПС}}>>1,$$

где $\tau_{ПС}=\left\|A_K\right\|^{-1}$ – интервал пограничного слоя [7].

Так как принимается значение $\tau_{ПС}$ из условия

$$\tau_{ПС}=\min_j\left(\tau_j\right)$$

а норма матрицы A_K на К-ом коммутационном интервале работы ВГ вычисляется «q» раз, то в качестве интервала $\tau_{ПС}$ при оценке коэффициента целесообразно выбирать величину, обратную максимальному значению полученной численным путем нормы, т.е.

$$\tau_{ПС}=\frac{1}{\max\limits_K\left\|A_K\right\|}.$$

Математическое моделирование показывает, что числа обусловленности матрицы A_K изменяются в диапазоне 14-40 в любой межкоммутационный интервал и в диапазоне 2×10^4 - 10^5 в коммутационные интервалы. При этом $К_{ЖИ}$ измеряется в пределах 8×10^2 – 10^4, т.е. система является жесткой.

В качестве метода численного интегрирования жесткой системы уравнений (25) выбран системный метод первого порядка Ю.В. Ракитского [7]. На основе данного метода сформулирован алгоритм автоматического выбора начального шага интегрирования

$$H_K=\alpha\left\|A_K\right\|^{-1},$$

общего шага h_k на k-ом основном интервале интегрирования и алгоритм определения моментов коммутации вентилей.

Структурная схема алгоритма цифрового моделирования шестифазного МЭГ с однополупериодным выпрямителем и основные блоки моделирующей программы показаны на рис. 5, где обозначены:

R_H, L_H – параметры активно-индуктивной нагрузки;

R_ϕ – активное сопротивление фазы генератора;

K_V, K_F – количество вентилей в схеме и число фаз генератора;

L_{ad}, L_{aq}, L_s – индуктивные параметры МЭГ;

E_{jm} – амплитудное номинальное напряжение фазы генератора;

[SK] – фундаментальная матрица контуров;

g_0 = 57,295° – константа, определяющая число градусов в одном радиане;

i_d, u_d – базисные ток и напряжение;

K_Q, a – настроечные коэффициенты;

$[i_0]$ – вектор начальных значений токов вентилей;

НК – параметр, характеризующий число шагов печати на каждом коммутационном интервале;

GGK1, GGK2 – задаваемые коммутационный и межкоммутационный шаги печати;

KG1, KG2, K – соответственно параметры счетчиков коммутационного шага, межкоммутационного шага и общего шага печати;

T10 – вспомогательная переменная контроля текущего времени;

PR = 1, при выводе результатов расчета на графопостроитель (ГП);

PR = 0, при выводе результатов расчета на АЦПУ;

NPT – число точек, выводимых на графики;

$T_{кон}$ – конечное время счета;

IDP – шаг дискретности вывода результатов на АЦПУ.

Для уменьшения погрешности вычислений, а также с целью сопоставления характеристик ВГ с различными исходными мощностями и деленными значениями параметров, расчеты на ЭВМ целесообразно проводить после записи уравнений (25) в относительных единицах.

На основе предложенной структурной схемы (рис. 5) разработана моделирующая программа решения системы уравнений (25). Время чис-

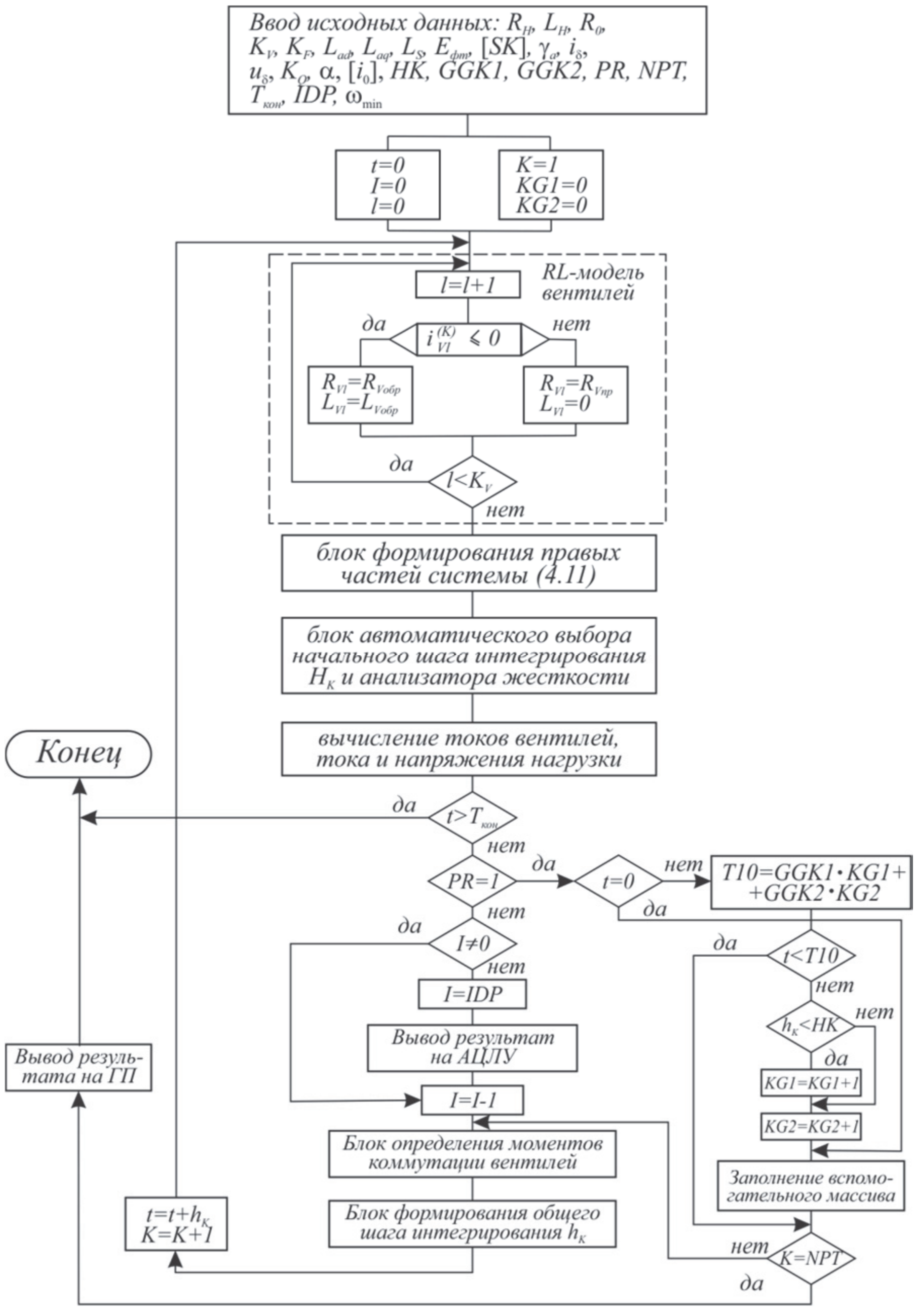

Рис. 5. Алгоритм цифровой модели ветильного МЭГ

ленного интегрирования за два периода изменения э.д.с. составляет 36-51 с при исследовании нормальных режимов работы ВГ, до 3 минут - для аварийных режимов. Настроечные коэффициенты при этом равны: α = 0,0001, K_Q = 1.

Шаг численных расчетов в каждый межкоммутационный интервал постоянства режимов при α = 0,0001 автоматически изменяется в диапазоне 2,5-2,6 электрич. градусов для нормальных режимов, уменьшаясь до величины порядка 1,8 электрич. градусов при аварийных режимах. При исследовании аварийных режимов коэффициент α рекомендуется на 3-4 порядка увеличить. Затраты машинного времени при этом значительно сокращаются.

Рассмотрим применение разработанной модели ВГ с однополупериодным выпрямителем при анализе аварийных режимов.

Внешнее к.з., пробой вентилей и обрывы фаз являются типичными аварийными режимами работы ВГ. С помощью математического моделирования установлено, что любой из этих режимов может стать причиной другого аварийного режима. Так при больших нагрузках и обрыве фаз ВГ в схеме возникают большие ударные токи, которые приводят к пробою наиболее нагруженных в данный момент времени вентилей. Пробой вентилей, в свою очередь, ведет к нарушению координационной устойчивости, то есть к отсутствию упорядоченного чередования коммутационных и межкоммутационных интервалов постоянства режимов.

Рассмотрим случай внешнего к.з. при малом значении сопротивления нагрузки.

На рис. 6 представлены зависимости мгновенных значений токов вентилей и тока нагрузки от угла поворота ротора γ. Если при исследовании нормальных режимов работы ВГ кривая мгновенных значений тока нагрузки являлась огибающей электромагнитных процессов токов вентилей, и амплитудные значения тока нагрузки и токов вентилей практически совпадали, то при анализе режима внешнего к.з. ($\Delta S_{ВГ} = R_{ном} / R_н$) амплитудные значения данных токов существенно отличаются. При этом помимо роста пульсаций выпрямленного напряжения для $\Delta S_{ВГ}$=10 сильно возрастают пульсации выпрямленного тока. Это происходит из-за того, что индуктивные параметры МЭГ и нагрузки становятся соизмеримыми по величине.

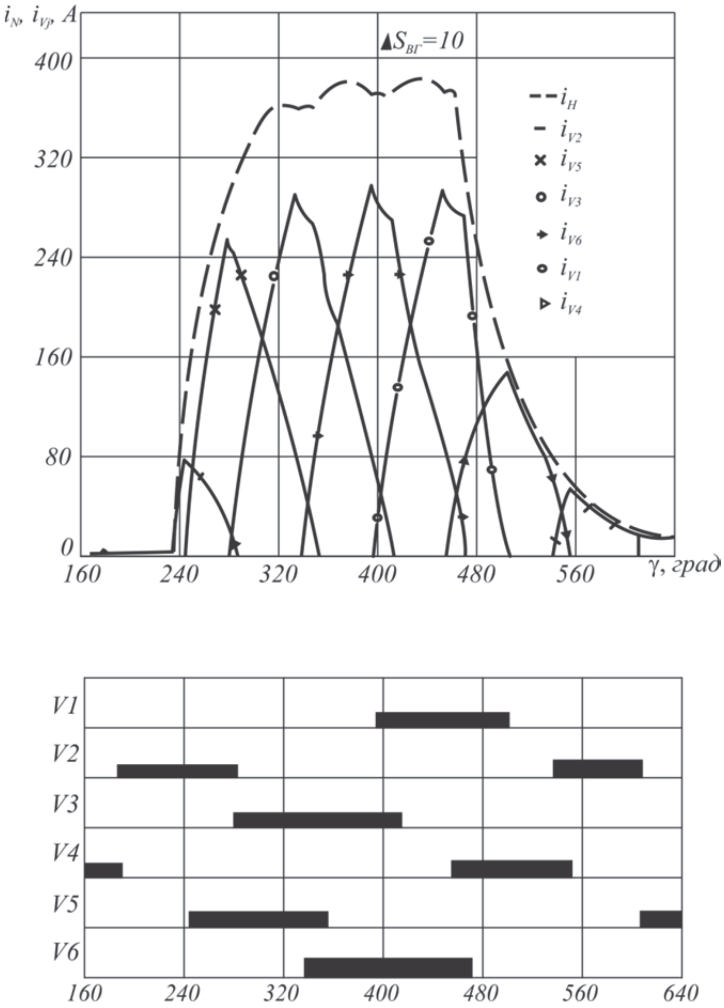

Рис. 6. Токи вентилей, нагрузки и циклограмма работы выпрямителя в режиме, близком к короткому замыканию

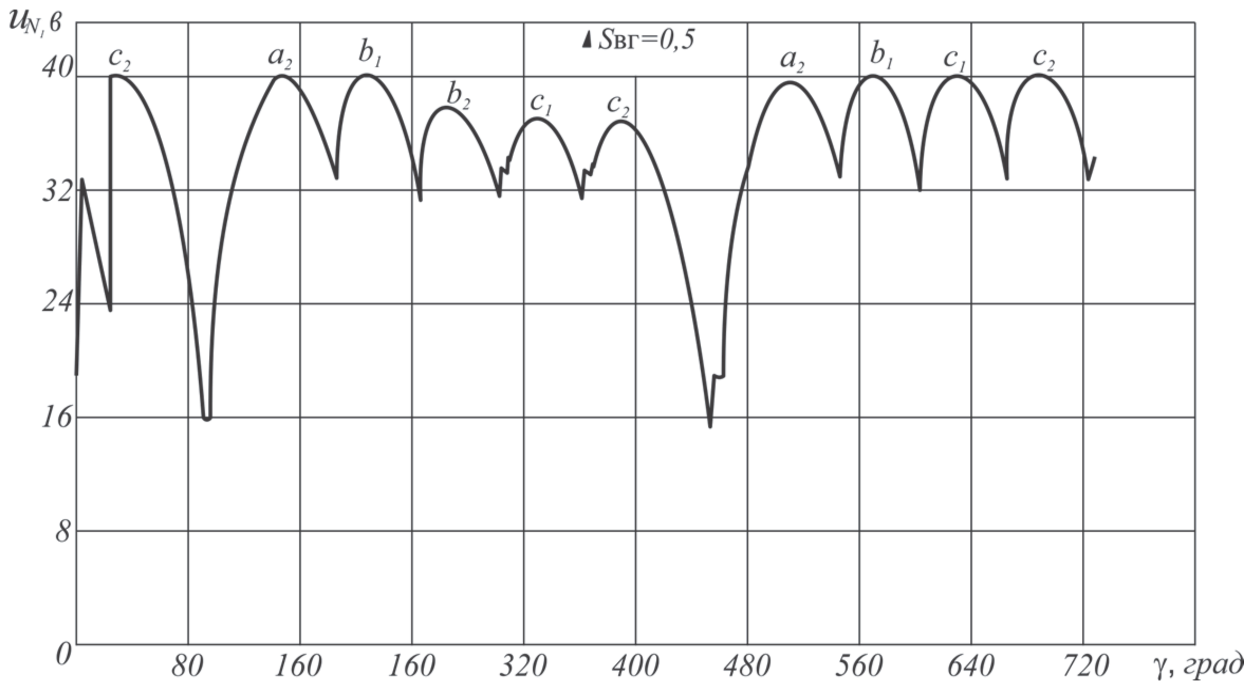

Рис. 7. Напряжение на нагрузке при обрыве фазы a_1 генератора

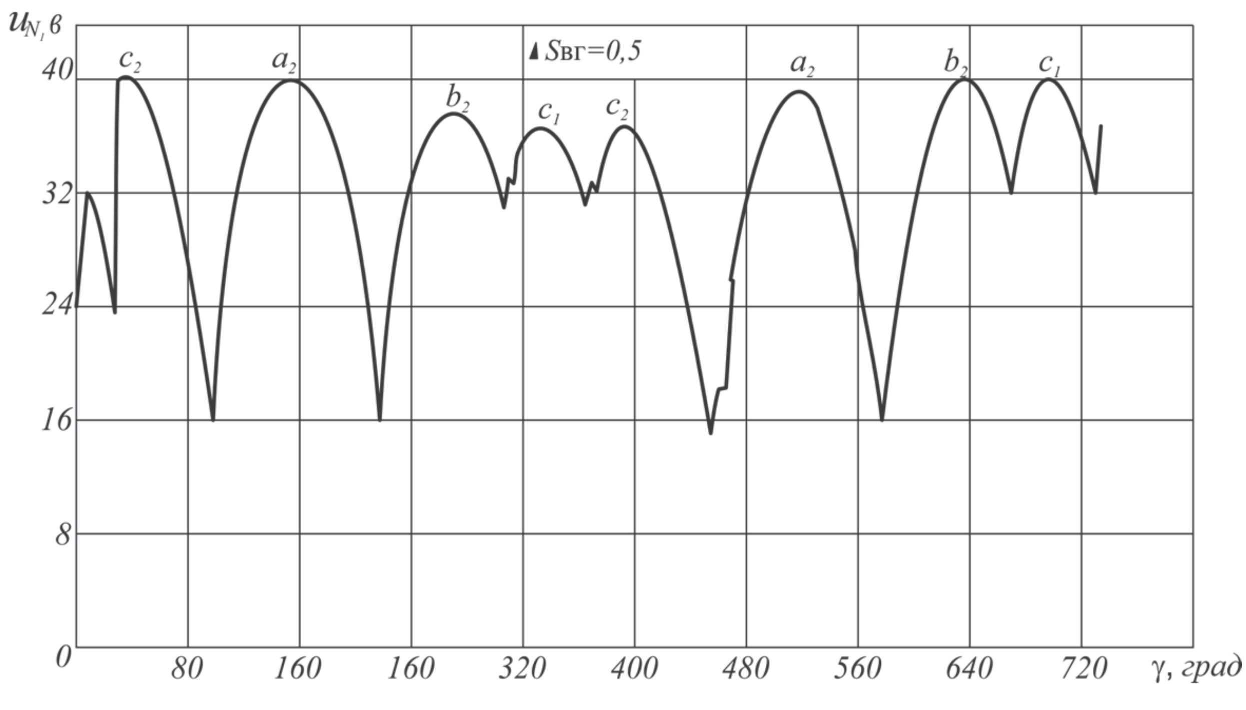

Рис. 8. Напряжение на нагрузке при обрыве фаз a_1 и b_1 генератора

Примеры переходных процессов в случае обрыва одной (a_1) и двух (a_1, b_1) фаз ВГ при набросе и сбросе нагрузки ($\Delta S_{ВГ}$ = 0,5) приведены на рис. 7-8 соответственно.

Работа схемы выпрямления ВГ при обрыве фаз a_1 и b_1 также поясняется графиками тока нагрузки, токов вентилей и циклограммой проводимости вентилей на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что при включении и отключении нагрузки $\Delta S_{ВГ}$ = 0,5 в процесс коммутации вступают вентили неповрежденных фаз ВГ. Вентили 1 и 2, соответствующие цепям оборванных фаз a_1 и b_1, на формирование выпрямленного тока и напряжения влияния не оказывают. Ток нагрузки, как и в случае анализа нормальных режимов работы ВГ, определяется как огибающая переходных процессов токов вентилей (штриховая линия на рис. 9).

Ряд близких и смежных вопросов моделирования объектов такой физической природы рассмотрен в работах [10-17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено математическое описание 6-фазного МЭГ с однополупериодным выпрямителем

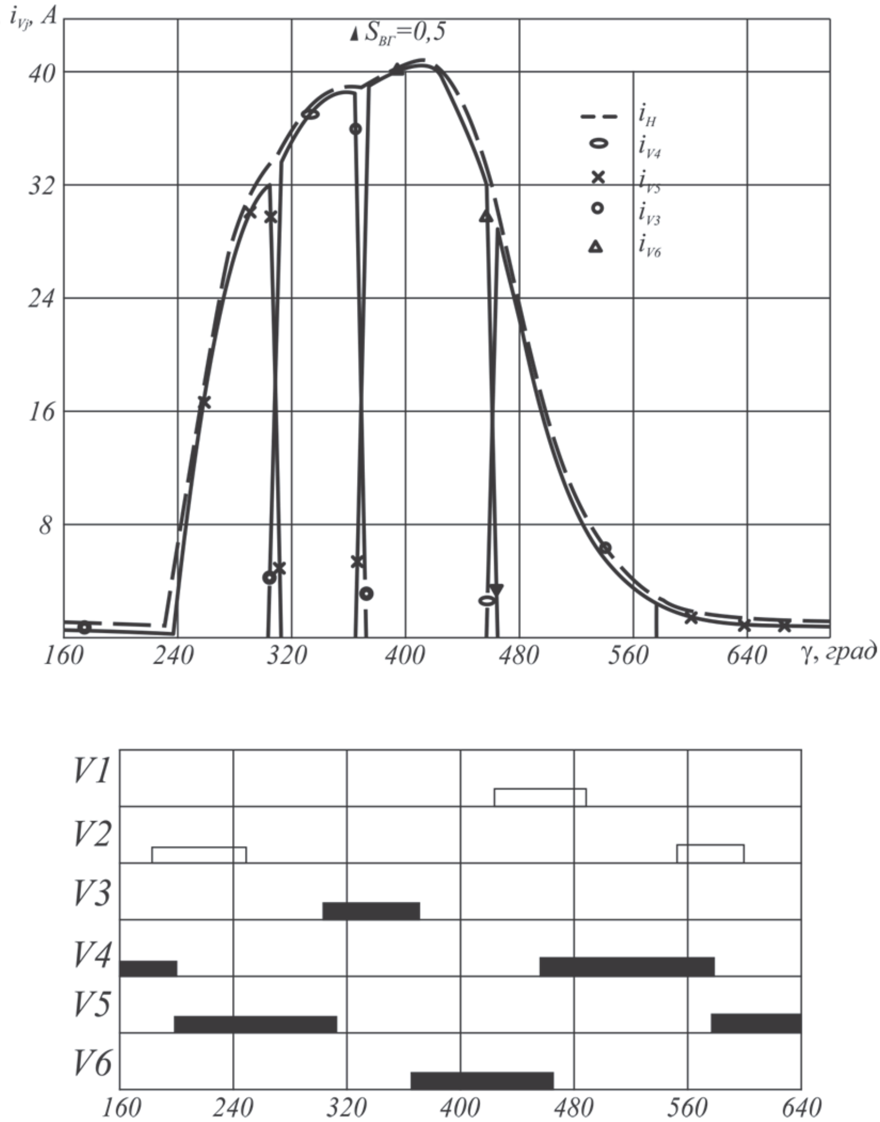

Рис. 9. Токи вентилей, нагрузки и циклограмма работы выпрямителя при обрыве a_1 и b_1 генератора

и активно-индуктивной нагрузкой на выходе при различных моделях вентильного звена.

Показаны основные этапы реализации рациональной методики численного анализа электромашинных вентильных систем.

Приведены результаты исследований на ЭВМ несимметричных аварийных режимов работы ВГ с помощью универсальной (в смысле отображения любого режима) математической модели.

Метод анализа и моделирующая программа легко обобщаются на случай *m*-фазного МЭГ и *m*-фазного однополупериодного выпрямителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нонака, С.* Характеристики трехфазного синхронного генератора с однололупериодным выпрямителем / С. Нонака, К. Кэсамару // Кюсю дайгаку когаку сюхо. – 1975. – Т.48. – №6. – С.797-801.
2. *Данеев, А.В.* Моделирование многофазных синхронных машин в различных системах координат / А.В. Данеев, Р.А. Данеев, В.Н. Сизых // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 104-115.
3. *Дедовский, А.Н.* Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А.Н. Дедовский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
4. *Вайман, М.Я. и др.* Некоторые вопросы упрощения математического описания автономной электроэнергетической системы / М.Я. Вайман и др. // Изв. ВУЗов СССР, сер. Энергетика. – 1974. – № 11. – С.8-15.
5. *Крон, Г.* Тензорный анализ сетей / Г. Крон. – М.: Советское радио. – 1978. - 520 с.
6. *Дижур, Д.П.* Цифровое моделирование электропередач постоянного тока // Передача энергии постоянным током / Д.П. Дижур. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С.51-63.
7. *Ракитский, Ю.В.* Численные методы решения жестких систем / Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий. – М.: Наука, 1979. - 208 с.
8. *Александров, А.А.* К вопросу моделирования вентильных синхронных машин на основе квазианалитического метода / А.А. Александров, Р.А. Данеев, В.Н. Сизых // Известия Самарского научного центра РАН. – 2019. – Т. 21. – № 4. – С. 63-69.

9. *Демирчян, К.С.* Моделирование и машинный расчет электрических цепей / К.С. Демирчян, П.А. Бутырин. – М.: Высшая шк., 1988. – 335 с.
10. *Данеев, А.В.* Об одном классе сильных дифференциальных моделей над счетным множеством динамических процессов конечного характера / А.В. Данеев, В.А. Русанов // Известия высших учебных заведений. Математика. – 2000. – № 2. – С. 32-40.
11. *Rusanov V.A.* Differential realization with a minimum operator norm of a controlled dynamic process // Advances in differrential equations and control processes. 2013. V.11. No 1. P. 1-40.
12. *Данеев, А.В.* К теории реализации сильных дифференциальных моделей. I / А.В. Данеев, А.В. Лакеев, В.А. Русанов, М.В. Русанов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2005. – Т. 8. – № 1 (21). – С. 53-63.
13. *Данеев, А.В.* К теории реализации сильных дифференциальных моделей. II / А.В. Данеев, А.В. Лакеев, В.А. Русанов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2005. – Т. 8. – № 2(22). – С. 46-56.
14. *Сизых, В.Н.* Итерационно-релаксационный метод нелинейного синтеза регуляторов / В.Н. Сизых // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 6. – С. 47-58.
15. *Данеев, А.В.* Методика исследования несимметричных режимов синхронных машин на основе интегральных уравнений Вольтерра второго рода / А.В. Данеев, Р.А. Данеев, В.Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 2. – С.143-150.
16. *Данеев, А.В.* К апостериорному моделированию нестационарных гиперболических систем / А.В. Данеев, В.А. Русанов, М.В. Русанов, В.Н. Сизых // Известия Самарского научного центра РАН. - 2018. – Т. 20. – № 1 (81). – С. 106-113.
17. *Данеев, А.В.* Расчет шестифазной линейной электрической цепи методом симметричных составляющих / А.В. Данеев, Р.А. Данеев, В.Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – №2. – С.17-24.

IMPLEMENTATION OF A RATIONAL METHOD OF NUMERICAL ANALYSIS TRANSITIONAL PROCESSES IN A VALVE MAGNETOELECTRIC GENERATOR WITH SIX-PHASE ZERO RECTIFICATION CIRCUIT

© 2022 A.V. Daneev[1], R.A.Daneev[2], V.N. Sizykh[1]

[1] Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia
[2] East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, Russia

The article poses and solves the problem of developing a universal simulation model of a six-phase magnetoelectric generator (MEG) with a half-wave rectifier based on the mathematical modeling technique, taking into account the rational form of representation of the valve generator (VG) equations and the optimal, in terms of machine time, organization computational procedures. The mathematical description of the gate MEG is based on the method of representing the model equations in a homogeneous coordinate basis of variables, which makes it possible to describe the electromagnetic processes of the SH by a system of differential equations (DE) of the minimum order (in terms of the number of independent circuit circuits - chords of a tree of a directed graph) order. This method is preferred due to the fact that the power structure of the investigated VG does not contain capacitive elements.

Keywords: numerical analysis, transients, valve magnetoelectric generator, six-phase zero rectification circuit.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-67-78

REFERENCES

1. *Nonaka, S.* Harakteristiki trekhfaznogo sinhronnogo generatora s odnololuperiodnym vypryamitelem / S. Nonaka, K. Kesamaru // Kyusyu dajgaku kogaku syuho. – 1975. – T.48. – № 6. – S.797-801.
2. *Daneev, A.V.* Modelirovanie mnogofaznyh sinhronnyh mashin v razlichnyh sistemah koordinat / A.V. Daneev, R.A. Daneev, V.N. Sizyh // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj Akademii nauk. - 2020. – T. 22. – № 4. - S. 104-115.
3. *Dedovskij, A.N.* Elektricheskie mashiny s vysokokoercitivnymi postoyannymi magnitami / A.N. Dedovskij. – M.: Energoatomizdat, 1985. - 168 s.
4. *Vajman, M.YA.* i dr. Nekotorye voprosy uproshcheniya matematicheskogo opisaniya avtonomnoj elektroenergeticheskoj sistemy / M.YA. Vajman i dr. // Izv. VUZov SSSR, ser. Energetika. – 1974. – № 11. – S.8-15.
5. *Kron, G.* Tenzornyj analiz setej / G. Kron. – M.: Sovetskoe radio. – 1978. – 520 s.
6. *Dizhur, D.P.* Cifrovoe modelirovanie elektroperedach postoyannogo toka // Peredacha energii postoyannym tokom / D.P. Dizhur. – M.: Energoatomizdat, 1985. – S.51-63.
7. *Rakitskij, YU.V.* CHislennye metody resheniya zhestkih sistem / YU.V. Rakitskij, S.M. Ustinov, I.G. CHernoruckij. – M.: Nauka, 1979. – 208 s.
8. *Aleksandrov, A.A.* K voprosu modelirovaniya ventil'nyh sinhronnyh mashin na osnove kvazianaliticheskogo metoda / A.A. Aleksandrov, R.A. Daneev, V.N. Sizyh // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. - 2019. – T. 21. – № 4. – S. 63-69.
9. *Demirchyan, K.S.* Modelirovanie i mashinnyj raschet elektricheskih cepej / K.S. Demirchyan, P.A. Butyrin. – M.: Vysshaya shk., 1988. – 335 s.
10. *Daneev, A.V.* Ob odnom klasse sil'nyh differencial'nyh modelej nad schetnym mnozhestvom dinamicheskih

processov konechnogo haraktera / A.V. Daneev, V.A. Rusanov // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Matematika. – 2000. – № 2. – S. 32-40.
11. *Rusanov V.A.* Differential realization with a minimum operator norm of a controlled dynamic process // Advances in differrential equations and control processes. 2013. V.11. No 1. P. 1-40.
12. *Daneev, A.V.* K teorii realizacii sil'nyh differencial'nyh modelej. I / A.V. Daneev, A.V. Lakeev, V.A. Rusanov, M.V. Rusanov // Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki. – 2005. – T. 8. – № 1 (21). – S. 53-63.
13. *Daneev, A.V.* K teorii realizacii sil'nyh differencial'nyh modelej. II / A.V. Daneev, A.V. Lakeev, V.A. Rusanov // Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki. – 2005. – T. 8. – № 2(22). – S. 46-56.
14. *Sizyh, V.N.* Iteracionno-relaksacionnyj metod nelinejnogo sinteza regulyatorov / V.N. Sizyh // Avtomatika i telemekhanika. – 2005. – № 6. – S. 47-58.
15. *Daneev, A.V.* Metodika issledovaniya nesimmetrichnyh rezhimov sinhronnyh mashin na osnove integral'nyh uravnenij Vol'terra vtorogo roda / A.V. Daneev, R.A. Daneev, V.N. Sizyh // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – 2020. – № 2. – S.143-150.
16. *Daneev, A.V.* K aposteriornomu modelirovaniyu nestacionarnyh giperbolicheskih sistem / A.V. Daneev, V.A. Rusanov, M.V. Rusanov, V.N. Sizyh // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2018. – T. 20. – № 1 (81). – S. 106-113.
17. *Daneev, A.V.* Raschet shestifaznoj linejnoj elektricheskoj cepi metodom simmetrichnyh sostavlyayushchih / A.V. Daneev, R.A. Daneev, V.N. Sizyh // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – 2021. – №2. – S.17-24.

Aleksey Daneev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Infor-mation Systems and Information Security. E-mail: daneev@mail.ru
Roman Daneev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Infor-mation Technologies. E-mail: romasun@mail.ru
Viktor Sizykh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation of Production Processes. E-mail: sizykh_vn@mail.ru