

## Математическая модель шестифазного магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой на выходе

А. В. Данеев<sup>1</sup>✉, Р. А. Данеев<sup>2</sup>, В. Н. Сизых<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ daneev@mail.ru

### Резюме

В авиационно-космической технике, а также в процессе реализации идеи перехода на постоянный ток повышенного напряжения 270 В (концепция построения самолета с полностью электрифицированным оборудованием) остро встала проблема разработки источников электрической энергии с большой мощностью. Эта проблема имеет решение на основе синхронных генераторов с возбуждением высококоэрцитивных постоянных магнитов, работающих на выпрямительную нагрузку. Такие генераторы получили название магнитоэлектрических. В статье исследуется методика разработки алгоритмического обеспечения магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем, который работает на активно-индуктивную нагрузку. При этом возникают вопросы, связанные с выбором рациональных форм представления моделей и рекомендациями по их практическому применению для исследования различных режимов работы такого генератора. Анализ процессов в магнитоэлектрическом генераторе может быть выполнен по математическим моделям с различными моделями вентиль. Исходные данные, параметры генератора и принимаемые при моделировании допущения те же, что и при исследовании работы магнитоэлектрического генератора на шестифазную нулевую схему выпрямления. Предлагаемый подход к математическому описанию вентильного генератора позволяет изучить электромагнитные процессы в магнитоэлектрическом генераторе с многофазным мостовым выпрямителем во всем диапазоне изменения нагрузок: от режима холостого хода до режима внешнего короткого замыкания генератора. Математическая модель шестифазного рассматриваемого вентильного генератора построена на основе матрично-топологического метода анализа электрических цепей в однородном базисе переменных.

### Ключевые слова

математическая модель, шестифазный магнитоэлектрический генератор, мостовой выпрямитель, активно-индуктивная нагрузка

### Для цитирования

Данеев А. В. Математическая модель шестифазного магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой на выходе / А. В. Данеев, Р. А. Данеев, В. Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 21–29. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).21-29

### Информация о статье

поступила в редакцию: 19.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.03.2022 г.; принята к публикации: 28.03.2022 г.

## Universal mathematical model of the six-phase magnetoelectric generator with bridge rectifier and active-inductive load at the output

A. V. Daneev<sup>1</sup>✉, R. A. Daneev<sup>2</sup>, V. N. Sizykh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, the Russian Federation

✉ daneev@mail.ru

### Abstract

In aerospace engineering and in the implementation of the idea of switching to direct current of increased voltage of 270 V (the concept of building an aircraft with fully electrified equipment), the problem of developing sources of high power electrical energy has become urgent. This problem has a solution based on synchronous generators with excitation of high-coercive permanent magnets, operating for a rectifying load. Such generators are called magnetoelectric generators. The paper investigates a methodology for the development of algorithmic support for magnetoelectric generators with a bridge rectifier, operating for an active-inductive load. Herefrom questions arise related to the choice of rational forms of representation of models and recommendations for their practical application in the study of various modes of magnetoelectric generators operation. The analysis of processes in magnetoelectric generator can be carried out using mathematical models with different valve designs. The initial data, the generator parameters and the assumptions made in the modeling are the same as in the study of the magnetoelectric generator operation for a six-phase zero rectification circuit. The proposed approach to the mathematical description of the valve

generator makes it possible to study electromagnetic processes in a magnetolectric generator with a multiphase bridge rectifier in the entire range of load changes: from no-load idling mode to external short-circuit of the generator. The mathematical model of the considered six-phase valve generator is built on the basis of a matrix-topological method for analyzing electrical circuits in a homogeneous basis of variables.

### Keywords

mathematical model, six-phase magnetolectric generator, bridge rectifier, active-inductive load

### For citation

Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Matematicheskaya model' shestifaznogo magnitoelektricheskogo generatona s mostovym vypryamitelem i aktivno-induktivnoy nagruzkoy na vykhode [Mathematical model of a six-phase magnetolectric generator with a bridge rectifier and an active-inductive load at the output]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 21–29. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).21-29

### Article Info

Received: 19.01.2022, Revised: 26.03.2021, Accepted: 28.03.2021

### Введение

Рассмотрим шестифазный магнитоэлектрический генератор (МЭГ) с мостовым выпрямителем. Нагрузка этого вентильного генератора (ВГ) – активно-индуктивная. Исходные данные, параметры генератора и принимаемые

допущения аналогичны исследованию работы МЭГ на шестифазную нулевую схему выпрямления [1].

Схема замещения исследуемого ВГ представлена на рис. 1.

В отличие от схемы замещения шести-

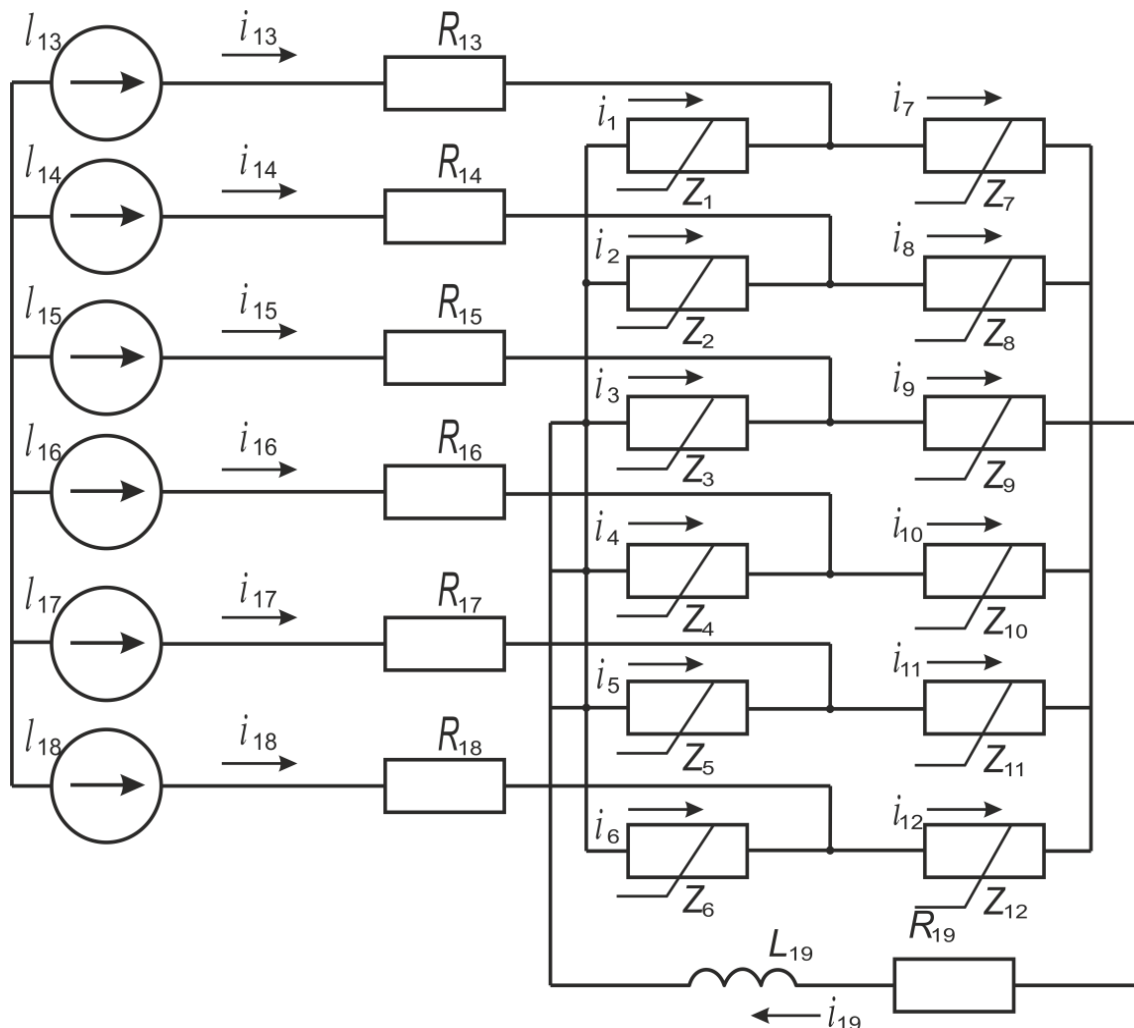


Рис. 1. Схема замещения вентильного магнитоэлектрического генератора  
Fig.1. Scheme of substitution of valve magnetolectric generator

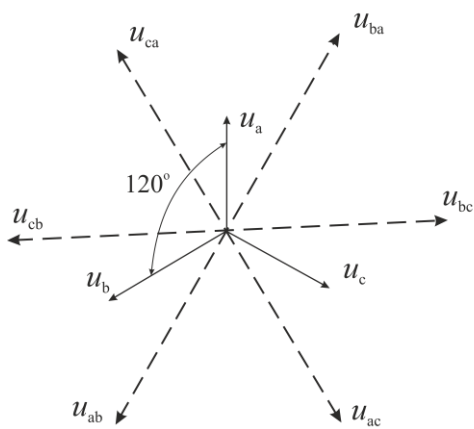
фазного мостового выпрямителя [2], где в моделирующей программе вектор ЭДС, наводимых постоянным магнитом (ПМ), формируется как последовательность синусоид со сдвигом в 60 эл., в данной схеме под вектором обобщенных ЭДС  $e = (e_{13}e_{14} \dots e_{18})^T$  понимается вектор ЭДС  $e = (e_{a1}e_{b1}e_{c1}e_{a2}e_{b2}e_{c2})^T$  двух трехфазных «обмоток» МЭГ  $a_j - b_j - c_j$  ( $j = 1, 2$ ) со сдвигом фаз в каждой обмотке 120 эл. Обмотки сдвинуты между собой на 60 эл. (рис. 2).

Такое представление ЭДС удобно при формировании симметрической матрицы индуктивностей и взаимных индуктивностей  $L(t)$  обмоток МЭГ [3].

**Постановка задачи**

Вид направленного связного графа (с числом ветвей  $p = 19$ , вершин  $q = 9$  и независимых контуров  $m = 11$ ) и его дерева по принимаемой нумерации ветвей схемы замещения ВГ и их приоритетной принадлежности к ребрам или хордам соответствует рис. 2 в работе А.Н. Дедовского «Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами» [2]. Контурная матрица при этом представляется как  $B = [E;K]$ . В схеме замещения ВГ отсутствуют емкостные элементы, для математического описания модели воспользуемся представлением переменных состояния в однородном базисе. Процессы в электрической цепи произвольной конфигурации описаны матричным уравнением [1] следующего вида:

$$e_x + ke_p = (z_x + kz_p k^T) \cdot i_x. \quad (1)$$



**Рис. 2.** Векторные диаграммы электродвижущей силы. фаз генератора  
**Fig.2.** Vector diagrams of electromotive force of generator phases

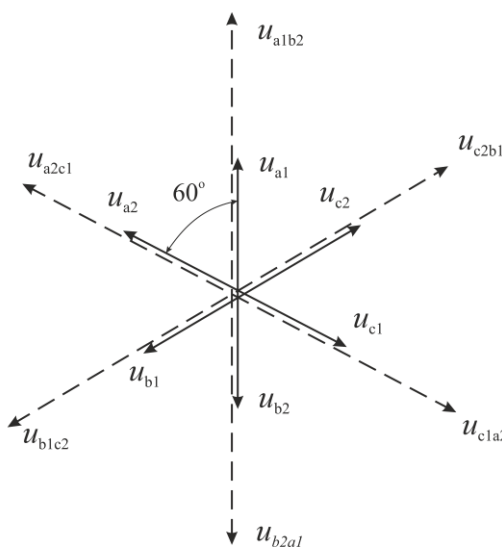
Фундаментальную матрицу контуров  $K$  разобьем (как показано жирными линиями) на следующие субматрицы:

$$K = [K_1; K_2; K_3],$$

где  $K_1$  – субматрица размерности  $11 \times 1$ , определяющая по столбцу ветвь вентилля 12 ( $V_p$  – ребро графа, соответствующее ветви с вентилем 12);  $K_2$  – субматрица размерности  $11 \times 6$ , характеризующая по столбцу ветви с источником обобщенных ЭДС ( $\Gamma_p$  – ребра графа, соответствующие фазам генератора);  $K_3$  – субматрица размерности  $11 \times 1$ , определяющая по столбцу ветвь нагрузки ( $H_p$  – ребро графа, соответствующее ветви нагрузки) (рис. 3).

|    | $V_p$ |    | $\Gamma_p$ |    |    |    |    |    | $H_p$ |  |
|----|-------|----|------------|----|----|----|----|----|-------|--|
|    | 12    | 13 | 14         | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |       |  |
| 1  | 1     | -1 | 0          | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |       |  |
| 2  | 1     | 0  | -1         | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |       |  |
| 3  | 1     | 0  | 0          | -1 | 0  | 0  | 1  | 1  |       |  |
| 4  | 1     | 0  | 0          | 0  | -1 | 0  | 1  | 1  |       |  |
| 5  | 1     | 0  | 0          | 0  | 0  | -1 | 1  | 1  |       |  |
| 6  | 1     | 0  | 0          | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |       |  |
| 7  | -1    | 1  | 0          | 0  | 0  | 0  | -1 | 0  |       |  |
| 8  | -1    | 0  | 1          | 0  | 0  | 0  | -1 | 0  |       |  |
| 9  | -1    | 0  | 0          | 1  | 0  | 0  | -1 | 0  |       |  |
| 10 | -1    | 0  | 0          | 0  | 1  | 0  | -1 | 0  |       |  |
| 11 | -1    | 0  | 0          | 0  | 0  | 1  | -1 | 0  |       |  |

**Рис. 3.** Фундаментальная матрица контуров  
**Fig. 3.** Fundamental contour matrix



На рис. 3 1  $V_x$  - хорды графа, соответствующие ветвям с вентилями 1-11.

Особенностью данного разбиения матрицы  $K$  является то, что в многофазной мостовой схеме выпрямления число вентиляей, равное  $K_v = 2m_\Gamma$  ( $m_\Gamma$  - число фаз МЭГ), на единицу больше числа независимых контуров  $m$ . Поэтому «избыток» вентиляей приходится включать в ребра дерева направленного графа. Это означает, что токи одного из вентиляей в мостовой схеме выпрямления становятся зависимыми от токов остальных вентиляей. Нелинейную модель вентиляей считаем заранее не заданной.

### Модель шестифазного магнитоэлектрического генератора с мостовым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой на выходе

В соответствии с принятым разбиением матрицы  $K$  и с учетом замены напряжения на  $L_H$  на условной ЭДС нагрузки  $e_H = -L_H \frac{di_H}{dt}$  переменные и матрицы параметров обобщенной ветви схемы замещения ВГ разделяются на переменные и подматрицы по принадлежности к ребрам и хордам дерева графа следующим образом:

$$i = \begin{bmatrix} i_X^T & i_p^T \end{bmatrix}^T, e = \begin{bmatrix} e_X^T & e_p^T \end{bmatrix}^T, z = \text{diag}\{z_x, z_p\},$$

где  $i_X = [i_1 \ i_2 \ \dots \ i_{11}]^T$  - токи вентиляей 1–11;

$i_p = [i_{12} \ i_{13} \ \dots \ i_{18} \ i_{19}]^T = [i_{12} \ i^* \ i_{19}]^T$ ;  $i_{12}$  - ток в ветви вентиля 12;  $i^* = [i_{a1} \ i_{b1} \ i_{c1} \ i_{a2} \ i_{b2} \ i_{c2}]^T$  - вектор фазных токов МЭГ размерности  $6 \times 1$ ;

$i_{19} = [i_H]$  - ток нагрузки;  $e_X = [0 \ \dots \ 0]^T$  - вектор с нулевыми элементами размерности  $11 \times 1$ ;

$e_p = [e_{13} \ \dots \ e_{18} \ i_{19}]^T = [e^* \ i_{19}]^T$ ;

$e^* = [e_{a1} \ e_{b1} \ e_{c1} \ e_{a2} \ e_{b2} \ e_{c2}]^T$  - вектор обобщенных ЭДС, равный  $e^* = -\frac{d(L(t) \cdot i^*)}{dt} + e_M$ ;  $i_{19} = [e_H]$  -

условная ЭДС нагрузки;  $Z_X = \text{diag}\{Z_1, \dots, Z_{11}\}$  - диагональная матрица полных сопротивлений вентиляей 1–11;

$Z_p = \text{diag}\{Z_{12}, \dots, R_{13}, \dots, R_{18}, \dots, R_{19}\} = \text{diag}\{Z_{12}, \dots, R^*, \dots, R_{19}\}$ ,  $Z_{12}$  - полное сопротивление вентиля 12;

$R^* = \text{diag}\{R_{a1} \ R_{b1} \ R_{c1} \ R_{a2} \ R_{b2} \ R_{c2}\}$  - диагональная матрица фазных сопротивлений МЭГ раз-

мерности  $6 \times 6$ ;  $R_{19} = [R_H]$  - активное сопротивление нагрузки.

Из топологического уравнения связи  $i_p = K^T i_X$  [4] имеем:

$$K_1^T i_X = i_{12}, \quad (2)$$

$$K_2^T i_X = i^*, \quad (3)$$

$$K_3^T i_X = i_{19}. \quad (4)$$

С учетом уравнений связи (3) перепишем выражение для вектора обобщенных ЭДС  $e^*$  в виде:

$$e^* = -\frac{dL(t)}{dt} \cdot K_2^T i_X - L(t) \cdot K_2^T \frac{di_X}{dt} + e_M. \quad (5)$$

Принимая во внимание принятое разделение переменных ветвей графа, из матричного уравнения (1), после подстановки в него соотношений (2) – (5), получим уравнения состояния исследуемого ВГ в канонической форме:

$$\left( K_2 \cdot L(t) \cdot K_2^T + K_3 L_H K_3^T \right) \cdot \frac{di_X}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} Z_X(i_X) + K_1 Z_{12}(i_{12}) \cdot K_1^T + \\ K_2 \left( R^* + \frac{dL(t)}{dt} \right) K_2^T + K_3 R_H K_3^T \end{array} \right\} + i_X + K_2 e_M. \quad (6)$$

Задаваясь в уравнениях (6) моделью вентиляей, окончательно получим полное математическое описание  $m_\Gamma$  - фазного МЭГ, работающего на мостовой выпрямителем и активно-индуктивную нагрузку:

1. Уравнения состояния размерности  $m \times 1$ :

1.1. Модель вентиля - пассивный двух-полюсник -

$$\frac{di_X}{dt} = A^*(i_v, t) \cdot i_X + B^*(i_v, t) \cdot e_M, \quad (7)$$

где матрицы коэффициентов при векторе состояния и ЭДС, индуцируемых ПМ, равны:

- при  $R$ -модели вентиляей:  $Z_v = R_v(i_v)$

$$A^*(i_v, t) = -C^*(t).$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_X(i_X) + K_1 R_{12}(i_{12}) \cdot K_1^T + \\ + K_2 \cdot \left( R^* + \frac{dL(t)}{dt} \right) \cdot K_2^T + K_3 R_H K_3^T \end{array} \right\};$$

$$B^*(i_v, t) = B^*(t) = C^*(t) K_2;$$

$$C^*(t) = (K_2 L(t) K_2^T + K_3 L_H K_3^T)^{-1};$$

где  $i_v = [i_1 \ \dots \ i_{12}]^T$  - вектор токов вентиляей размерности  $12 \times 1$ ;

$$R_v(i_v) = \text{diag}\{R_X(i_X), \dots, R_{12}(i_{12})\},$$

где  $R_X(i_X)$  – диагональная матрица нелинейных активных сопротивлений вентилях 1-11;

$R_{12}(i_{12})$  – нелинейное активное сопротивление вентиля 12;

– при  $R-L$  – модели вентилях:

$Z_V = R_V(i_V) + L_V(i_V) \cdot p$ ,  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования.

$$A^*(i_V, t) = -C^*(i_V, t) \cdot \{R_X(i_X) + K_1 R_{12}(i_{12}) K_1^T + K_2 \left( R^* + \frac{dL(t)}{dt} \right) \cdot K_2^T + K_3 R_H K_3^T\};$$

$$B^*(i_V, t) = C^*(i_V, t) \cdot K_2;$$

$$C^*(i_V, t) = \left( K_2 L(t) K_2^T + K_3 L_H K_3^T + \right)^{-1} \cdot \left( + L_X(i_X) + K_1 L_{12}(i_{12}) K_1^T \right);$$

$$L_V = \text{diag}\{L_X(i_X), L_{12}(i_{12})\};$$

где  $L_X(i_X)$  – диагональная матрица фиктивных индуктивностей вентилях 1-11;  $L_{12}(i_{12})$  – фиктивная индуктивность вентиля 12.

1.2. Модель вентиля – идеальный ключ –

$$\left( K_2 L(t) K_2^T + K_3 L(t) K_3^T \right) \frac{di_X}{dt} + u_{VX} + K_1 u_{V12} = \left\{ \begin{array}{l} K_3 R_H K_3^T + \\ + K_2 \left( R^* + \frac{dL(t)}{dt} \right) \cdot K_2^T \end{array} \right\} i_X + K_2 e_M, \quad (8)$$

где  $u_{VX} = R_X(i_X) \cdot i_X$  – вектор напряжений ветвей

с вентилями 1-11 размерности  $11 \times 1$ ;  $u_{V12} = R_{12}(i_{12}) \cdot i_{12}$  – напряжение в ветви вентиля 12.

Для вентиля, проводящего в конкретный момент времени ток, напряжение в ветви равно нулю.

2. Уравнение связи:

$$\left. \begin{array}{l} i^* = K_2^T i_X, \\ i_{12} = K_1^T i_X, \\ i_H = K_3^T i_X \end{array} \right\} \quad (9)$$

4. Уравнение нагрузки (рис. 4):

$$u_H = R_H i_H + L_H K_3^T \cdot \frac{di_X}{dt}. \quad (10)$$

На основе (9) – (10) и (7), соответствующих выбранной  $RL$ -модели вентилях [1], была разработана универсальная математическая модель (ММ) шестифазного МЭГ с мостовой схемой выпрямления. По составленной модели разработан программный комплекс, основные блоки которого соответствуют стандартным модулям [1]. Расчеты по формулам (7), (9) – (10) выполнялись в относительных единицах. Время численного интегрирования при настройках коэффициентов:  $\alpha = 1/267$ ,  $K_Q = 0,01$  было равно 1,5 – 2 минутам за один период изменения ЭДС. Межкоммутационный шаг автоматически изменялся в пределах 4,0 – 4,2 эл.

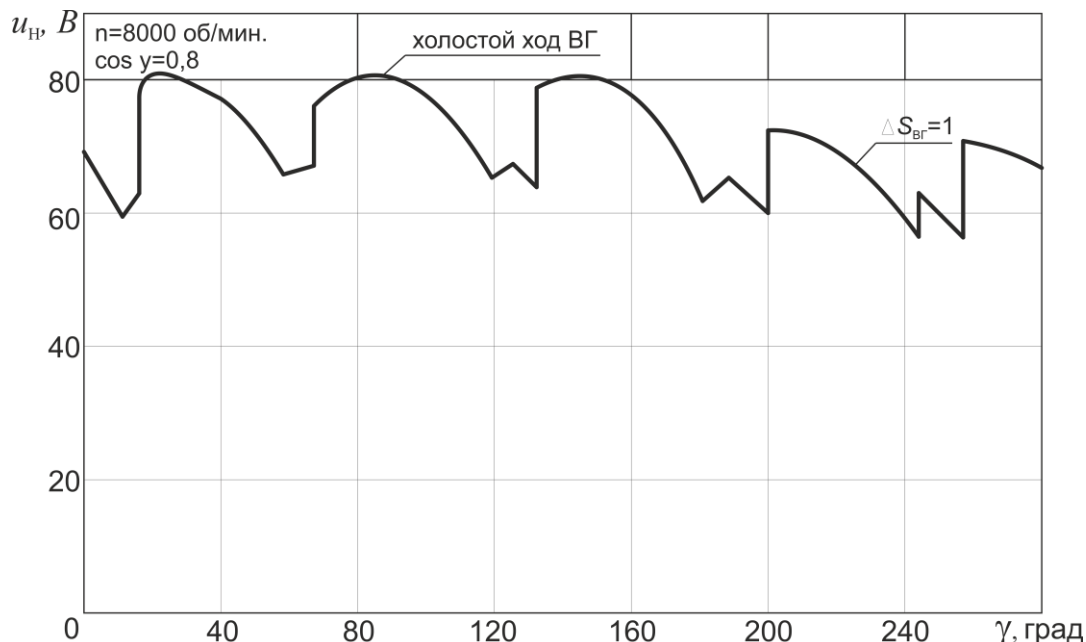


Рис. 4. Напряжение на выходе при изменении режима генератора от холостого хода до номинальной нагрузки

Fig. 4. Output voltage while changing generator mode from idling to nominal load

Анализ диаграмм линейных и фазных напряжений для трехфазной и шестифазной мостовых схем выпрямления (см. рис. 2) позволяет говорить об идентичности электромагнитных процессов, имеющих место в трехфазном и шестифазном ВГ с симметричной статорной обмоткой. Отличие заключается в том, что в трехфазном ВГ фазные напряжения сдвинуты относительно линейных на угол в  $30^\circ$ , т.е.  $U_{\text{лн}} = 2U_{\text{фм}} \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_{\text{фм}}$ , тогда как в шестифазном ВГ эти напряжения совпадают по направлению, и максимальное линейное напряжение равно  $U_{\text{лн}} = 2U_{\text{фм}}$ .

Справедливость этого факта подтверждается графиком функций  $i_{\text{H}}=f(\gamma)$  (см. рис. 4) для случая холостого хода ВГ:  $\cos\varphi=0,8$ ;  $R_{\text{H}}=100$  Ом;  $U_{\text{фм}}=40,3$  В и наброса нагрузки  $\Delta S_{\text{ВГ}}=1$  ( $\Delta S_{\text{ВГ}}=R_{\text{НОМ}}/R_{\text{H}}$ ).

Моделирование показывает, что в исследуемой мостовой схеме основные режимы проводимости вентилях следующие:

- режим с проводимостью вентилях 2–3 ( $\gamma_{\text{K}} < 30^\circ$ ,  $\gamma_{\text{П}} < 120^\circ$ );
- режим с проводимостью вентилях 2–4 ( $30^\circ \leq \gamma_{\text{K}} < 60^\circ$ ,  $120^\circ \leq \gamma_{\text{П}} < 180^\circ$ );
- режим с проводимостью вентилях по 4 ( $\gamma_{\text{K}} = 60^\circ$ ,  $\gamma_{\text{П}} = 180^\circ$ ).

Режим проводимости 2-3 поясняется зависимостями  $i_{\text{vj}} = f(\gamma)$  и циклограммой работы вентилях (рис. 5) для случая наброса и сброса номинальной нагрузки ( $\Delta S_{\text{ВГ}}=1$ ,  $\cos\varphi = 0,8$ ).

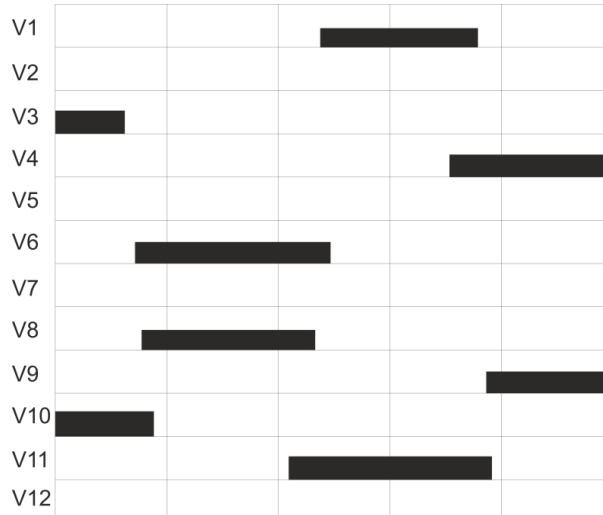
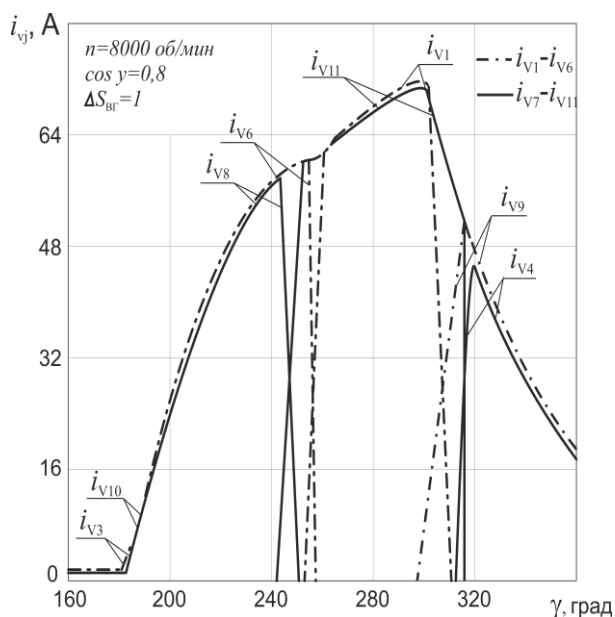


Рис. 5. Токи вентилях, нагрузки и циклограмма работы выпрямителя при коммутациях номинальной нагрузки

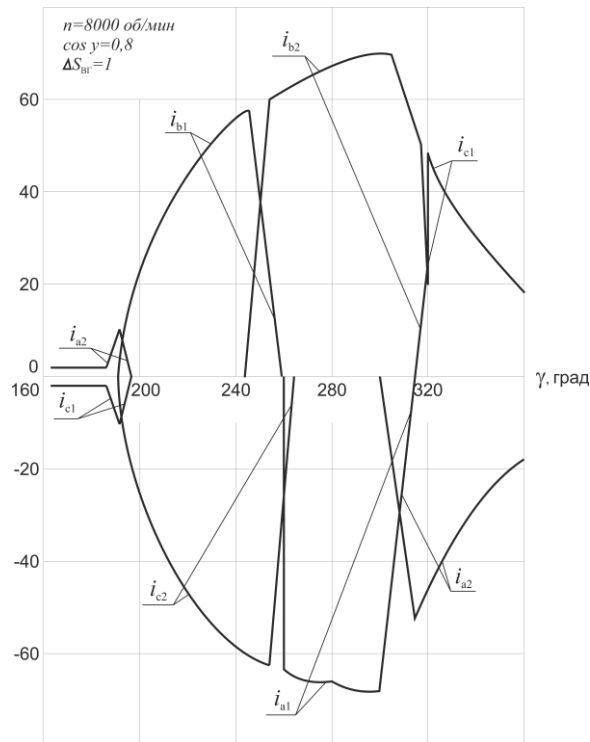
Fig. 5. Valve currents, loads and rectifier operation cyclogram under commutations of a nominal load

Из циклограммы видно, что данный режим соответствует чередованию одиночной работы вентилях и их коммутации ( $\gamma_{\text{K}} = 5 - 12,7^\circ$ ) в пределах катодной или анодной групп. По времени интервалы коммутации в этих группах вентилях не совпадают между собой. Причиной задержки коммутации вентилях в одной из групп из шести вентилях является снижение напряжения в проводящем межфазном контуре при коммутации вентилях в другой группе.

При углах перекрытия вентилях от  $\gamma_{\text{K}} = 30^\circ$  в схеме устанавливается режим 2–4, являющийся основным режимом работы исследуемого ВГ.

Режим с проводимостью 2–4 приведен в [2] и поясняется по циклограмме переключательной схемы шестифазного мостового выпрямителя при его представлении нелинейной резистивной системой. Соответствие рассмотренных режимов с аналогичными режимами проводимости вентилях в шестифазной мостовой схеме ВГ устанавливается по табл. и зависимости  $i_{\text{vj}} = f(\gamma)$  при набросе и сбросе нагрузки:  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $\Delta S_{\text{ВГ}} = 1$  (рис. 6).

При дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки вентилях начинают проводить группами по 4 ( $\gamma_{\text{K}}=60^\circ$ ). Данный режим проводимости вентилях сохраняется вплоть до возникновения аварийных режимов.



**Рис. 6.** Токи фаз генератора при коммутациях номинальной нагрузки  
**Fig. 6.** Currents of generator phases under commutations of nominal loads

Соответствие типа вентильной системы и проводимости клапанов при максимальном линейном напряжении

Correspondence of the valve system type and valve conductivity under maximum linear voltage

| Тип вентильной системы                       | Проводимость клапанов при максимальном линейном напряжении |              |              |              |              |              |
|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|  | $u_{a_1b_2}$   | $u_{a_2c_1}$ | $u_{b_1c_2}$ | $u_{b_2a_1}$ | $u_{c_1a_2}$ | $u_{c_2b_1}$ |
| Вентильный генератор как резистивная система | 7-4  | 8-5          | 9-6          | 10-1         | 11-2         | 12-3         |
| Вентильный генератор                         | 7-5  | 10-3         | 8-6          | 11-1         | 9-4          | 12-2         |

### Заключение

Таким образом, предложенный в работе подход к математическому описанию ВГ на основе принятой в [1] методики математического моделирования позволяет исследовать электромагнитные процессы в МЭГ с многофазным мостовым выпрямителем во всем диа-

пазоне изменения нагрузок: от режима холостого хода до режима внешнего короткого замыкания генератора.

Ряд близких и смежных вопросов моделирования объектов такой физической природы рассмотрен в работах [5 – 18].

### Список литературы

1. Данеев А.В., Данеев Р.А., Сизых В.Н. Моделирование многофазных синхронных машин в различных системах координат // Изв. Самар. науч. центра Рос. Акад. наук. 2020. Т. 22. № 4. С. 104–115.
2. Дедовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М. : Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
3. Вайман М.Я. и др. Некоторые вопросы упрощения математического описания автономной электроэнергетической системы // Изв. ВУЗов СССР. Сер. Энергетика. 1974. №11. С. 8–15.
4. Ильин В.Н. Машинное проектирование электронных схем. М. : Энергия, 1972. 274 с.
5. Важнов А.Ш. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л. : Энергия, 1980. 320 с.
6. Якубович В.А., Старжинский В.М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. М. : Наука, 1972. 720 с.

7. Лупкин В.М. Аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений вентильного двигателя // *Электричество*. 1981. № 6. С. 22–31.
8. Бреус К.А. О приводимости канонической системы дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами // *АН СССР*. 1958. Т. 123. № 1. С. 21–24.
9. Daneev A.V., Sizykh V.N., Oboltin R.U. Parametric synthesis of stabilizing neuroocular control of a technological module // *IOP Conf. Series*: 2094. 2021. P. 1–6. DOI:10.1088/1742-6596/2094/5/052066.
10. Данеев А.В., Сизых В.Н. Алгоритмическое обеспечение конструирования оптимальных регуляторов по неклассическим функционалам качества в вырожденной формулировке // *Информационные технологии, их приложения и информационное образование : материалы II Междунар. науч. конф. Улан-Удэ, 2021*. С. 74–79.
11. Daneev A.V., Sizykh V.N. Associating automat for technological processes adaptive control on based of neural networks // *Helix The scientific Explorer*. 2018. Vol. 8 (2). P. 3046–3054.
12. Александров А.А., Данеев Р.А., Сизых В.Н. К вопросу моделирования вентильных синхронных машин на основе квазианалитического метода // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. 2019. Т. 21. № 4. С. 63–69.
13. Дижур Д.П. Цифровое моделирование электропередач постоянного тока // *Передача энергии постоянным током*. М. : Энергоатомиздат, 1985. С. 51–63.
14. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноуцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. М. : Наука, 1979. 208 с.
15. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М. : Высш. шк., 1988. 335 с.
16. Конев Ф.Б., Ярлыкова Н.Е. Методы численного решения систем дифференциальных уравнений, применяемые в цифровых моделях вентильных преобразователей // *Итоги науки и техники. Сер. Силовая преобразовательная техника*. М. : Информэлектро, 1978. 50 с.
17. Лукин В.Н., Романов М.Ф., Толкачев Э.А. Системный анализ электрических цепей и машин. Л. : Изд-во ЛГУ, 1985. 136 с.
18. Беляев П.В. Некоторые свойства математических моделей динамики статических преобразователей энергии // *Динамика электрических машин*. Омск : ОПИ, 1984. С. 68–74.

### References

1. Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Modelirovanie mnogofaznykh sinkhronnykh mashin v razlichnykh sistemakh koordinat [Modeling of multi-phase synchronous machines in different coordinate systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2020, vol. 22, no 4, pp. 104 – 115.
2. Dedovskiy A.N. Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami [Electrical machines with high-coercivity permanent magnets]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. 168 p.
3. Vayman M.Ya. and others. Nekotorye voprosy uproshcheniya matematicheskogo opisaniya avtonomnoy elektroenergeticheskoi sistemy [Some questions of simplifying the mathematical description of an autonomous electric power system]. *Izvestiya VUZov SSSR. Seriya Energetika* [Bulletin of Universities of the USSR, ser. Energy]. 1974, no 11, pp.8-15.
4. Il'in V.N. Mashinnoe proektirovanie elektronnykh skhem [Machine design of electronic circuits]. Moscow: Energiya Publ., 1972. 274 p.
5. Vazhnov A.Sh. Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka [Transient processes in AC machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1980. 320 p.
6. Yakubovich V.A., Starzhinskiy V.M. Lineynye differentsial'nye uravneniya s periodicheskimi koeffitsientami i ikh prilozheniya [Linear differential equations with periodic coefficients and their applications]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 720 p.
7. Lupkin V.M. Analiticheskoe reshenie lineynykh differentsial'nykh uravneniy ventil'nogo dvigatelya [Analytical solution of linear differential equations of a brushless motor]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1981, no 6, pp. 22-31.
8. Breus K.A. O privodimosti kanonicheskoy sistemy differentsial'nykh uravneniy s periodicheskimi koeffitsientami [On the reducibility of a canonical system of differential equations with periodic coefficients]. *AN SSSR [AS of USSR]*. 1958, vol. 123, no 1, pp. 21-24.
9. Daneev A.V., Sizykh V.N., Oboltin R.U. Parametric synthesis of stabilizing neuroocular control of a technological module // *IOP Conf. Series*: 2094 (2021). Pp. 1-6. 052066. doi:10.1088/1742-6596/2094/5/052066.
10. Daneev A.V., Sizykh V.N. Algoritmicheskoe obespechenie konstruirovaniya optimal'nykh regulyatorov po neklassicheskim funktsionalam kachestva v vyrozhdennoy formulirovke [Algorithmic support for designing optimal controllers based on non-classical quality functionals in a degenerate formulation]. *Materiyal'y II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii, ikh prilozheniya i informatsionnoe obrazovanie»* [Proceedings of Second International Conference «Information technologies, their applications and information education»]. Ulan-Ude: Buryat State University named after Dorzhi Banzarov Publ., 2021, pp. 74-79.
11. Daneev A.V., Sizykh V.N. Associating automat for technological processes adaptive control on based of neural networks // *Helix The scientific Explorer*. Vol. 8(2), 2018. Pp. 3046-3054.
12. Aleksandrov A.A., Daneev R.A., Sizykh V.N. K voprosu modelirovaniya ventil'nykh sinkhronnykh mashin na osnove kvazianaliticheskogo metoda [On the issue of modeling valve synchronous machines based on a quasi-analytical method]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2019, vol. 21, no 4, pp. 63-69.



13. Dizhur D.P. Tsifrovoye modelirovaniye elektropredach postoyannogo toka [Digital modeling of direct current power transmission]. *Peredacha ehnergii postoyannym tokom* [Energy transmission by direct current]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, pp. 51-63.

14. Rakitskii Yu.V., Ustinov S.M., Chernorutskii I.G. Chislennyye metody resheniya zhestkikh sistem [Numerical methods for solving stiff systems]. Moscow: Nauka Publ., 1979. 208 p.

15. Demirchyan K.S., Butyrin P.A. Modelirovaniye i mashinnyi raschet elektricheskikh tsepei [Modeling and machine calculation of electrical circuits]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988. 335 p.

16. Konev F.B., Yarlykova N.E. Metody chislennogo resheniya sistem differentsial'nykh uravnenii, primenyaemye v tsifrovyykh modelyakh ventil'nykh preobrazovatelei [Methods for the numerical solution of systems of differential equations used in digital models of valve converters]. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. «Silovaya preobrazovatel'naya tekhnika»* [Results of science and technology. Ser. «Power converting technology»]. Moscow: Informelectro Publ., 1978. 50 p.

17. Lukin V.N., Romanov M.F., Tolkachev E.A. Sistemnyi analiz elektricheskikh tsepei i mashin [System analysis of electrical circuits and machines]. Leningrad: LGU Publ., 1985. 136 p.

18. Belyaev P.V. Nekotorye svoystva matematicheskikh modelei dinamiki staticheskikh preobrazovatelei energii [Some properties of mathematical models of the dynamics of static energy converters]. *Dinamika ehlektricheskikh mashin* [Dynamics of electrical machines]. Omsk: OPI, 1984, pp. 68-74.

#### Информация об авторах

*Данеев Алексей Васильевич*, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: daneev@mail.ru

*Данеев Роман Алексеевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-правовых дисциплин, Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, e-mail: romasun@mail.ru

*Сизых Виктор Николаевич*, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sizykh\_vn@mail.ru

#### Information about the authors

*Alexei V. Daneev*, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of Department «Information Systems and Information Protection», Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: daneev@mail.ru

*Roman A. Daneev*, Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor of Department «Information and Legal Disciplines», East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, e-mail: romasun@mail.ru

*Victor N. Sizykh*, Doctor of Engineering Science, Professor, the Full Professor of Department «Automation of Production Processes», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sizykh\_vn@mail.ru