

УДК 621.313.333.+621.31.03+621.314

УДК 621.313.333.+621.31.03+621.314

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В АКСИАЛЬНЫХ
МНОГОФАЗНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ
УСТАНОВКАХ**

**DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL
MODEL OF THE ELECTROMAGNETIC AND
ELECTROMECHANICAL TRANSIENT
PROCESS IN AXIAL POLYPHASE ELECTRIC
GENERATOR APPARATUS**

Гайтов Багаудин Хамидович
д.т.н., профессор
*Кубанский государственный технологический
университет, г. Краснодар, Россия*

Gaitov Bagaudin Hamidovich
Dr.Sci.Tech., professor
*Kuban State technological university, Krasnodar,
Russia*

Кашин Яков Михайлович
к.т.н., доцент
*Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-
воздушная академия», (филиал г. Краснодар),
Россия*

Kashin Yakov Mihailovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
Air Force Academy (Branch, Krasnodar), Russia

Копелевич Лев Ефимович
к.т.н., доцент
*Кубанский государственный технологический
университет, г. Краснодар, Россия*

Kopelevich Lev Yefimovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

Кашин Александр Яковлевич
в/ч 66551, г. Майкоп, Россия

Kashin Alexander Yakovlevich
military unit 66551, Maykop, Russia

Голованов Александр Александрович
*Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-
воздушная академия», (филиал г. Краснодар),
Россия*

Golovanov Alexander Alexandrovich
Air Force Academy (Branch, Krasnodar), Russia

Копелевич Мария Львовна
*Кубанский государственный технологический
университет, г. Краснодар, Россия*

Kopelevich Mariya Lvovna
*Kuban State technological university, Krasnodar,
Russia*

Предложена и описана аксиальная
многофазная бесконтактная электрическая
машина-генератор. Дано устройство и принцип
действия машины, разработана математическая
модель для исследования переходных
процессов в ней

This article deals with the description of axial
contactless electric machine generator. The machine's
structure and principles of operation is described and
the mathematical model, for the research of the
transient process in it, are presented

Ключевые слова: АКСИАЛЬНАЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА-ГЕНЕРАТОР,
ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС,
МАГНИТОПРОВОД, НАПРЯЖЕНИЕ,
ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕ

Keywords: AXIAL TWO ELECTRIC MACHINE
GENERATOR, TRANSIENT PROCESS,
MAGNETIC CORE, VOLTAGE, MAGNETIC
LINKAGE

Многофазные генераторные установки предназначены для
электрообеспечения отдельных объектов или группы объектов.

К многофазным генераторным установкам относится аксиальная двухвходовая бесконтактная машина-генератор (АДБМ-Г) [1]. Эта машина разработана в Кубанском государственном технологическом университете.

На рис. 1 представлен общий вид разработанной АДБМ-Г в разрезе, на рис. 2 – ее электрическая схема.

АДБМ-Г содержит: корпус 1, постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя, боковой аксиальный магнитопровод 3 с многофазной обмоткой 4 якоря подвозбудителя, однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя и дополнительной обмоткой 6 возбуждения возбудителя, которая подключается к источнику постоянного тока через контакты 19 (рис. 2), внутренний аксиальный магнитопровод 7 с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя и однофазной обмоткой возбуждения 9 основного генератора, боковой аксиальный магнитопровод 10 с многофазной (на рис. 2 – девятифазной) обмоткой 11 якоря основного генератора, вал 12, закрепленный в подшипниковых узлах 13 и 14 и жестко связанный с постоянным многополюсным магнитом 2 индуктора подвозбудителя посредством диска 15 и с внутренним аксиальным магнитопроводом 7 посредством диска 16. Однофазная обмотка возбуждения 5 возбудителя подключается к многофазной обмотке 4 якоря подвозбудителя через многофазный двухполупериодный (на рис. 2 – девятифазный) выпрямитель 17. Однофазная обмотка возбуждения 9 основного генератора подключается к многофазной обмотке 8 якоря возбудителя через многофазный (на рис. 2 – девятифазный) двухполупериодный выпрямитель 18.

Многофазная обмотка 11 якоря основного генератора может быть подключена к многофазному двухполупериодному выпрямителю.

АДБМ-Г работает следующим образом. При вращении постоянного многополюсного магнита 2 индуктора подвозбудителя и внутреннего аксиального магнитопровода 7 с многофазной обмоткой 8 якоря

возбудителя и однофазной обмоткой 9 возбуждения основного генератора магнитный поток многополюсного постоянного магнита 2 индуктора подвозбудителя взаимодействует с многофазной обмоткой 4 якоря подвозбудителя, уложенной в пазы бокового аксиального магнитопровода 3, жестко установленного в корпусе генератора, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется многофазным двухполупериодным выпрямителем 17 и подается на однофазную обмотку 5 возбуждения возбудителя, уложенную в пазы бокового аксиального магнитопровода 3. При этом в однофазной обмотке 5 возбуждения возбудителя создается магнитный поток.

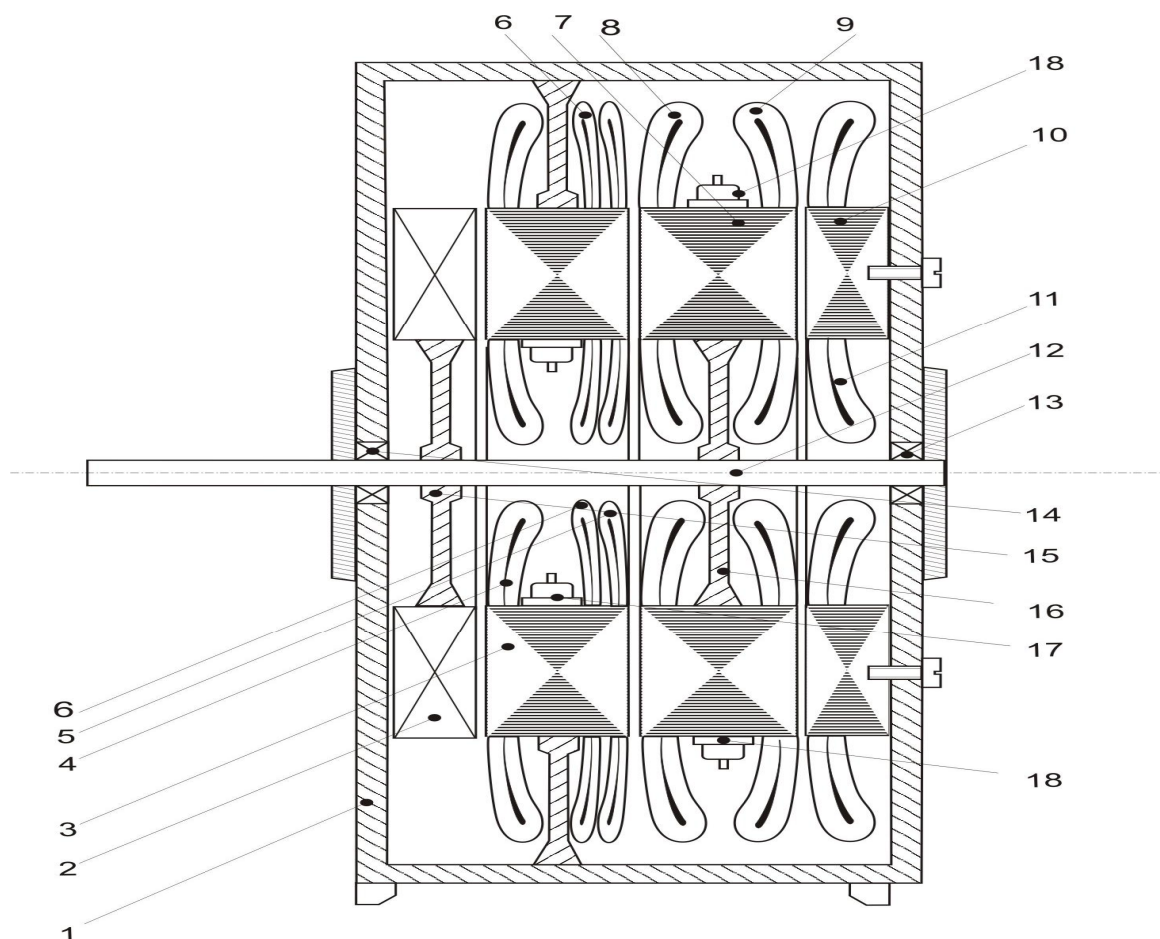


Рисунок 1 - Общий вид АДБМ-Г в разрезе

При подаче постоянного тока (например, от фотоэлектрических преобразователей) через контакты 19 по дополнительной обмотке 6 возбуждения возбудителя протекает ток, при этом создается магнитный поток, направленный согласно с магнитным потоком, создаваемым однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя. По принципу суперпозиции магнитных полей магнитные потоки, создаваемые обмоткой 5 и дополнительной обмоткой 6 возбуждения возбудителя, суммируются. Суммарный магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя, уложенной в пазы внутреннего аксиального магнитопровода 7, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая в свою очередь последовательно преобразуется, как описано выше для АДБМ-Г, и наводит в многофазной обмотке 11 якоря основного генератора многофазную систему ЭДС, которая подается в сеть.

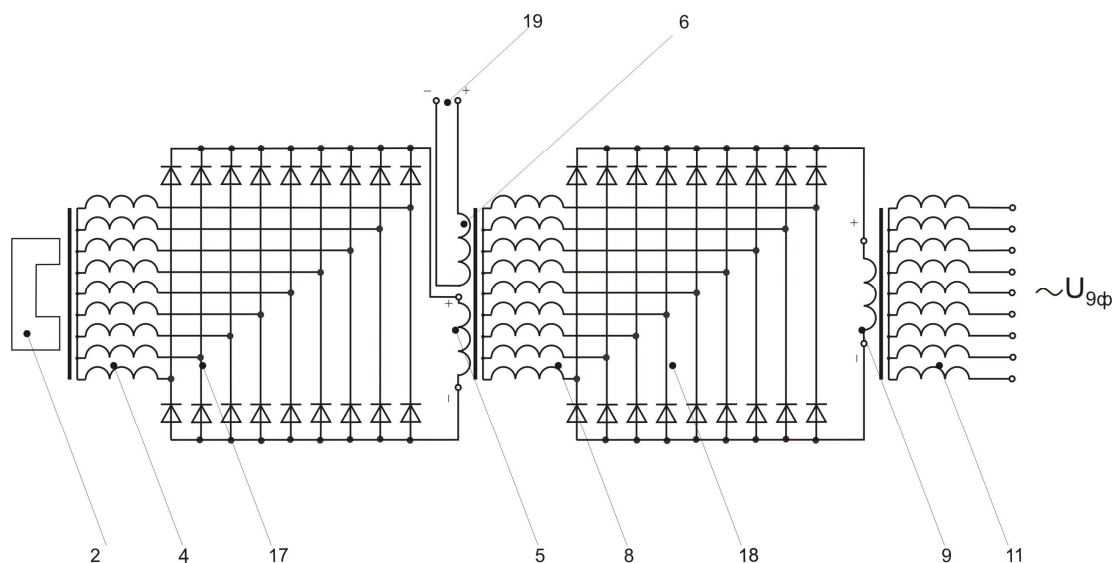


Рисунок 2 – Электрическая схема АДБМ-Г

Для проведения анализа работы АДБМ-Г, оценки качества переходных процессов, определения характеристик генератора в динамических режимах работы необходимо составить математическую модель электромагнитных и электромеханических переходных процессов установки.

Большая часть энергии магнитного поля в электрических машинах (ЭМ) сосредоточена в небольшом воздушном зазоре. В реальных машинах в воздушном зазоре наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число высших гармоник поля. Учет всех факторов, определяющих точность результатов математического моделирования ЭМ, с одной стороны, и достаточная простота реализации построенной математической модели, с другой стороны, определяются принятой системой координат. В электромеханике существует множество систем координат, однако, на практике нашли применение в основном двухфазные оси (неподвижные $a - b$, вращающиеся с синхронной скоростью $d - q$ и вращающиеся с произвольной скоростью $u - v$) и соответствующие им трехфазные оси ($a - b - g$, $d - q - s$ и $u - v - w$) [2, 3].

Следует отметить, что симметричную многофазную электрическую машину с синусоидальным напряжением на ее обмотках удобно анализировать, приведя ее к двухфазной.

Математическую модель АДБМ-Г построим при следующих допущениях:

- АДБМ-Г геометрически симметричен, то есть обмотки расположены равномерно;
- АДБМ-Г электрически симметричен, то есть активные сопротивления и индуктивности обмоток по осям одинаковы;
- АДБМ-Г магнитно симметричен, то есть потокосцепления постоянных магнитов равны;
- в листах стали магнитопровода нет разъемов и стыков.

При составлении математической модели АДБМ-Г машину для наглядности условно разбиваем на отдельные части, которые затем объединяем в единое целое с учетом потокосцеплений. Таким частями в электромагнитном отношении являются (рис. 1, 2, 3): подвозбудитель,

состоящий из постоянного многополюсного магнита 3 и многофазной обмотки якоря 4; возбудитель, состоящий из однофазной обмотки 5 возбуждения, дополнительной обмотки 6 возбуждения и многофазной обмотки 8 якоря; основной генератор, состоящий из однофазной обмотки 8 возбуждения и многофазной обмотки 11 якоря. Обмотки уложены в пазах соответствующих магнитопроводов. Работа выпрямителей учтена в выражениях для напряжений, которыми запитываются соответствующие обмотки.

На рис. 3 приведены пространственные модели отдельных частей машины в привязке к осям α - β . На рис. 3 обозначено: ПМ – постоянный магнит, М3, М7, М10 – аксиальные магнитопроводы 3, 7 и 10 в соответствии с рис. 1, 2. Система координатных осей жестко связана со статором, ротор с обмотками вращается со скоростью ω_p .

Дифференциальные уравнения напряжений для подвозбудителя записанные для результирующих векторов, имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_B^{ПМ} = R_B^{ПМ} \cdot i_B^{ПМ} + \frac{dy_B^{ПМ}}{dt}; \\ -U_a^{s4} = R_a^{s4} \cdot i_a^{s4} + \frac{dy_a^{s4}}{dt} + \omega_p \cdot y_a^{s4}; \\ -U_b^{s4} = R_b^{s4} \cdot i_b^{s4} + \frac{dy_b^{s4}}{dt} - \omega_p \cdot y_b^{s4}, \end{array} \right. \quad (1)$$

Потокосцепления в (1) получим из выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_B^{ПМ} = L_B^{ПМ} \cdot i_B^{ПМ} + M_1 \cdot i_a^{s4}; \\ \Psi_a^{s4} = L_a^{s4} \cdot i_a^{s4} + M_1 \cdot i_B^{ПМ}; \\ \Psi_b^{s4} = L_b^{s4} \cdot i_b^{s4}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Выпрямленное напряжение на обмотке 5 возбуждения возбудителя:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d^{s5} = \frac{1}{T} \int_0^T U_a^{s4} dt; \\ U_d^{s5} = 3,1 \cdot U_a^{s4}. \end{array} \right. \quad (3)$$

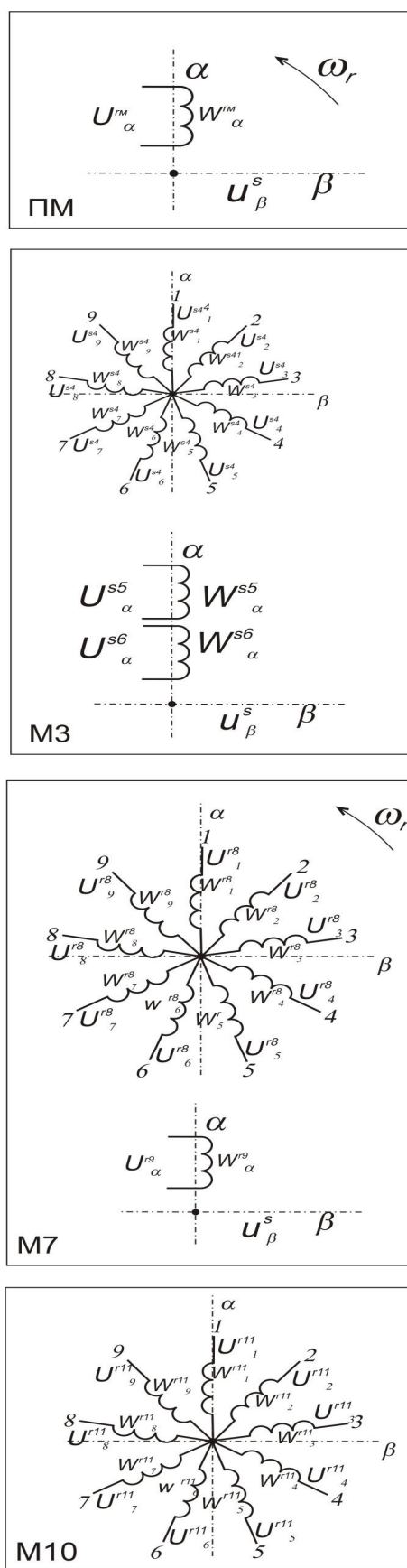


Рисунок 3 – Пространственная модель АДБМ-Г

Уравнения напряжений на обмотках возбuditеля 5, 6 и 8:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d^{s5} = R^{s5} \cdot i_5; \\ U^{s6} = R_a^{s6} \cdot i_a^{s6} + \frac{dy^{s6}}{dt}; \\ -U_a^{r8} = R_a^{r8} \cdot i_a^{r8} + \frac{dy_a^{r8}}{dt} + w_p \cdot y_a^{r8}; \\ -U_b^{r8} = R_b^{r8} \cdot i_b^{r8} + \frac{dy_b^{r8}}{dt} - w_p \cdot y_b^{r8} \end{array} \right. \quad (4)$$

Потокоцепления в (4) получим из выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l} y^{s5} = L^{s5} \cdot i^{s5} + M_2 \cdot i^{s6} + M_2 \cdot i_a^{r8}; \\ y^{s6} = L^{s6} \cdot i^{s6} + M_2 \cdot i^{s5} + M_2 \cdot i_a^{r8}; \\ y_a^{r8} = L_a^{r8} \cdot i_a^{r8} + M_2 \cdot i^{s5} + M_2 \cdot i^{s6}; \\ y_b^{r8} = L_b^{r8} \cdot i_b^{r8}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Токи i_j^{r8} в фазах девятифазной обмотки 8 якоря возбuditеля, где j – номер фазы, определяются по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1^{s8} = i_a^8; \\ i_2^{s8} = \frac{i_a^8}{\cos j_1} = \frac{i_b^8}{\cos 1,25j_1}; \\ i_3^{s8} = \frac{i_a^8}{\cos 2j_1} = \frac{i_b^8}{\cos 0,25j_1}; \\ i_4^{r8} = -\frac{i_a^8}{\cos 1,5j_1} = \frac{i_b^8}{\cos 0,75j_1}; \\ i_5^{r8} = -\frac{i_a^8}{\cos 0,5j_1} = \frac{i_b^8}{\cos 1,75j_1}; \\ i_6^{r8} = -\frac{i_a^8}{\cos 0,5j_1} = -\frac{i_b^8}{\cos 1,75j_1}; \\ i_7^{r8} = -\frac{i_a^8}{\cos 1,5j_1} = -\frac{i_b^8}{\cos 0,75j_1}; \\ i_8^{r8} = \frac{i_a^8}{\cos 2j_1} = -\frac{i_b^8}{\cos 0,25j_1}; \\ i_9^{r8} = \frac{i_a^8}{\cos j_1} = -\frac{i_b^8}{\cos 1,25j_1}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Выпрямленное напряжение на обмотке 9 возбуждения генератора:

$$\begin{cases} U_d^{r9} = \frac{1}{T_2} \int_0^T U_a^{r9} dt; \\ U_d^{r9} = 3,1 \cdot U_a^{r9}. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения напряжений на обмотках 9 и 11 основного генератора:

$$\begin{cases} U_d^{r9} = R^{r9} \cdot i^{r9} + \frac{dy^{r9}}{dt}; \\ -U_a^{s11} = R_a^{s11} \cdot i_a^{s11} + \frac{dy_a^{s11}}{dt} + w_p \cdot y_a^{s11}; \\ -U_b^{s11} = R_b^{s11} \cdot i_b^{s11} + \frac{dy_b^{s11}}{dt} - w_p \cdot y_b^{s11}. \end{cases} \quad (8)$$

Потокосцепления в (8) получим из выражений:

$$\begin{cases} y^{r9} = L^{r9} \cdot i^{r9} + M_3 \cdot i_a^{s11}; \\ y_a^{s11} = L_a^{s11} \cdot i_a^{s11} + M_3 \cdot i^{r9}; \\ y_b^{s11} = L_b^{s11} \cdot i_b^{s11}; \end{cases} \quad (9)$$

Токи i_j^{s11} в фазах девятифазной обмотки 11 якоря основного генератора, где j – номер фазы, определяются по формулам (10).

В уравнениях 1–10 обозначено: верхний индекс: s – принадлежность параметра к обмотке, расположенной на статоре, r – на роторе, i – номер обмотки в соответствии с рис. 1, 2, 3; U_a^{si} , U_b^{si} , i_a^{si} , i_b^{si} , R_a^{si} , R_b^{si} – напряжения, токи и активные сопротивления девятифазных обмоток якоря подвозбудителя ($i = 4$), якоря возбудителя ($i = 8$) и якоря основного генератора ($i = 11$) соответственно по осям заторможенной системы координат a и b ; w_p – угловая скорость вращения ротора (постоянного многополюсного магнита 2 и магнитопровода 7) (рис. 1, 2, 3); M_1 – взаимная индуктивность обмотки возбуждения и девятифазной обмотки 4 якоря подвозбудителя; M_2 – взаимная индуктивность обмоток 5 и 6 возбуждения и девятифазной обмотки 8 якоря возбудителя; M_3 – взаимная

индуктивность обмотки 9 возбуждения и девятифазной обмотки 11 якоря основного генератора; $j_1 = 2p / m_2$ – угол сдвига фаз, $m_2 = 9$ – число фаз обмоток 4 якоря подвозбудителя, 8 якоря возбудителя и 11 якоря основного генератора. U_d^{si} – выпрямленное напряжение на обмотке 5, 6 и 9 соответственно; R^{si} – сопротивления обмоток 5, 6 и 9 соответственно, j – номер фазы.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 i_1^{s11} = i_a^{i11}; \\
 i_2^{s11} = \frac{i_a^{i11}}{\cos j_1} = \frac{i_b^{i11}}{\cos 1,25j_1}; \\
 i_3^{s11} = \frac{i_a^{i11}}{\cos 2j_1} = \frac{i_b^{i11}}{\cos 0,25j_1}; \\
 i_4^{s11} = -\frac{i_a^{i11}}{\cos 1,5j_1} = \frac{i_b^{i11}}{\cos 0,75j_1}; \\
 i_5^{s11} = -\frac{i_a^{i11}}{\cos 0,5j_1} = \frac{i_b^{i11}}{\cos 1,75j_1}; \\
 i_6^{s11} = -\frac{i_a^{i11}}{\cos 0,5j_1} = -\frac{i_b^{i11}}{\cos 1,75j_1}; \\
 i_7^{s11} = -\frac{i_a^{i11}}{\cos 1,5j_1} = -\frac{i_b^{i11}}{\cos 0,75j_1}; \\
 i_8^{s11} = \frac{i_a^{i11}}{\cos 2j_1} = -\frac{i_b^{i11}}{\cos 0,25j_1}; \\
 i_9^{s11} = \frac{i_a^{i11}}{\cos j_1} = -\frac{i_b^{i11}}{\cos 1,25j_1}.
 \end{array} \right. \quad (10)$$

Уравнения динамики механической части АДБМ-Г имеют вид уравнений равновесия моментов:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\mathcal{E}} = M_C + J \frac{dw_p}{dt}; \\ M_{\mathcal{E}} = [M_1 \cdot (i_B^{IM} \cdot i_a^{s4}) - M_2 \cdot (i^{s5} \cdot i_b^{r8} + i^{s6} \cdot i_b^{r8}) + M_3 \cdot (i^{r9} \cdot i_b^{s11})] \cdot p; \\ M_C = a \cdot w_p^b + c w_p^d + n, \end{array} \right. (11)$$

где $M_{\mathcal{E}}$ – электромагнитный момент, J – момент инерции вращающихся масс, M_C – момент сопротивления, a, b, c, d, n – коэффициенты, учитывающие зависимость момента сопротивления M_C от угловой скорости вращения ротора w_p , p – число пар полюсов АДБМ-Г

Литература

1. Аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина-генератор. Решение о выдаче патента на изобретение № 2011101117/07(001374) от 14.10.2011 г. // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., Голощапов А.В.
2. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высшая школа, 1987. - 248 с.
3. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высшая школа, 1994, 321 с.