

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХВХОДОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ-ГЕНЕРАТОРА

Гансецкий Д.В.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, dimka_vdv@tut.by

Обостряющаяся экологическая обстановка и возрастающий в последнее время энергетический кризис, с одной стороны, близкое к истощению состояние запасов органического топлива и в то же время смещение перспективных взглядов на ядерную энергетику, с другой стороны, привели к естественной активизации поисков других, нетрадиционных, экологически чистых источников энергии. В настоящее время основным (98 %) источником получения электрической энергии в мире является ископаемое топливо. Вместе с тем энергия, поступающая от Солнца на Землю, превышает современное энергопроизводство, примерно, в 2^{104} раз. К этому следует добавить, что около 2 % поступающей на Землю солнечной радиации превращается в энергию ветра, как результат тепловых процессов, происходящих в атмосфере [1].

Можно сказать, что едва начавшейся эре энергии полезных органических ископаемых уже сейчас грозит закат в силу трех следующих обстоятельств: ограниченность органических ископаемых, их невосполнимость и экологическое загрязнение окружающей среды при их использовании.

В общем случае энергию ископаемого топлива, и даже гидроэнергию, используемую человеком для получения электрической энергии, можно рассматривать как преобразованную солнечную энергию по схеме: солнечная радиация – органический синтез (образование каменного угля, нефти, газа и т.п.) – сжигание топлива (получение тепловой энергии) – преобразование тепловой энергии сначала в механическую (в турбине), а затем – в электрическую (в генераторе); или по схеме: солнечная радиация – испарение влаги – конденсация – осадки – водоемы – преобразование механической энергии водного потока в электрическую энергию. Однако коэффициент преобразования солнечной энергии, как подавляющей энергии на Земле, по приведенным (природным) схемам не превышает сотых долей процента и это означает, что огромный её поток, поступающий на Землю, используется в незначительных количествах [1].

Использование традиционных электрических машин для нетрадиционной области энергетики либо неэффективно, либо вовсе невозможно из-за невысокой плотности потока возобновляемых источников энергии (ВИЭ), прерывистого характера поступления последних. Так, плотность радиации Солнца у земной поверхности и ветровой энергии при скорости до 10 м/с колеблется от нуля до 1 кВт/м², тогда как плотность потока электромагнитной энергии в воздушном зазоре обычной электрической машины (ЭМ) составляет 50 кВт/мм² [1].

Основные требования к нетрадиционным электромеханическим преобразователям энергии (ЭМПЭ) вытекают из характера используемых энергоисточников и требований, предъявляемых потребителями к энергосистеме: обеспечить удовлетворительный уровень колебания не более $\pm 10\%$ выходного напряжения и не более $\pm 5\%$ частоты – в генераторном режиме работы; не более $\pm 10\%$ момента и угловой скорости вращения – в двигательном режиме при постоянных, резких и многократных по величине колебаниях входных параметров. Другим важным требованием, уже к автономным энергосистемам, является обеспечение возможности максимального уменьшения мощности накопителя энергии в автономной энергосистеме. В настоящее время накопители энергии используются для полного восполнения мощности источника в моменты резкого ослабления или отсутствия используемого для данного преобразователя ВИЭ, что приводит к неоправданно большой мощности накопителя энергии. Это отрицательно сказывается на экономических и качественных показателях систем электроснабжения. Таким образом, перспектива

расширенного использования ВИЭ напрямую связана с проблемой разработки новых, нетрадиционных типов ЭМ и систем управления ими, т.е. с развитием нетрадиционной электромеханики [2].

В Кубанском государственном технологическом университете (КубГТУ) разработана двухвходовая электрическая машина-генератор (ДЭМ-Г). Создание ДЭМ-Г позволило впервые решить такую фундаментальную научную задачу, как электромагнитное сложение двух видов энергии, полученных от двух возобновляемых источников энергии (ветроагрегата и фотоэлектрических преобразователей), получая на выходе генератора суммарную электрическую энергию синусоидальной формы, которая может быть использована для любых потребителей электрической энергии и являться источником дополнительной мощности для погашения пиковых нагрузок энергосистемы [3].

Двухвходовая электрическая машина-генератор (ДЭМ-Г) представляет собой сложное электромеханическое устройство. Двухвходовая машина названа в силу того, что имеет два входа: электрический от фотоэлектрических преобразователей и механический от ветроагрегата. ДЭМ-Г суммирует энергию, поступающую с этих двух входов и преобразует в энергию многофазного переменного тока [2, 3, 5]. Особенностью ДЭМ-Г является то, что она не имеет неподвижных частей как любой классический электромеханический преобразователь [4, 5].

На рисунках 1, 2 представлены конструкция ДЭМ-Г и электрическая схема ДЭМ-Г соответственно (позиции отдельных элементов электрической схемы (рисунок 2) соответствуют аналогичным позициям конструкции ДЭМ-Г на рисунке 1). ДЭМ-Г содержит (рисунок 1): 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 (рисунок 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 рисунке 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 рисунке 2 – девятифазный) выпрямитель 17. Однофазная обмотка возбуждения 9 основного генератора подключается к многофазной обмотке 8 якоря возбудителя через многофазный (на рисунке 2 – девятифазный) двухполупериодный выпрямитель 18. Многофазная обмотка 11 якоря основного генератора может быть подключена к многофазному двухполупериодному выпрямителю [4, 5].

ДЭМ-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 [4].

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, и наводит в многофазной обмотке 11 якоря основного генератора многофазную систему ЭДС, которая подается в сеть [4].

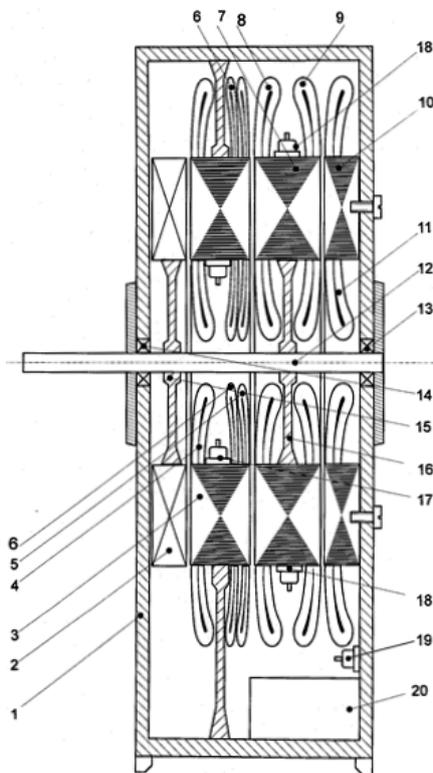


Рисунок 1 – Конструкция ДЭМ-Г

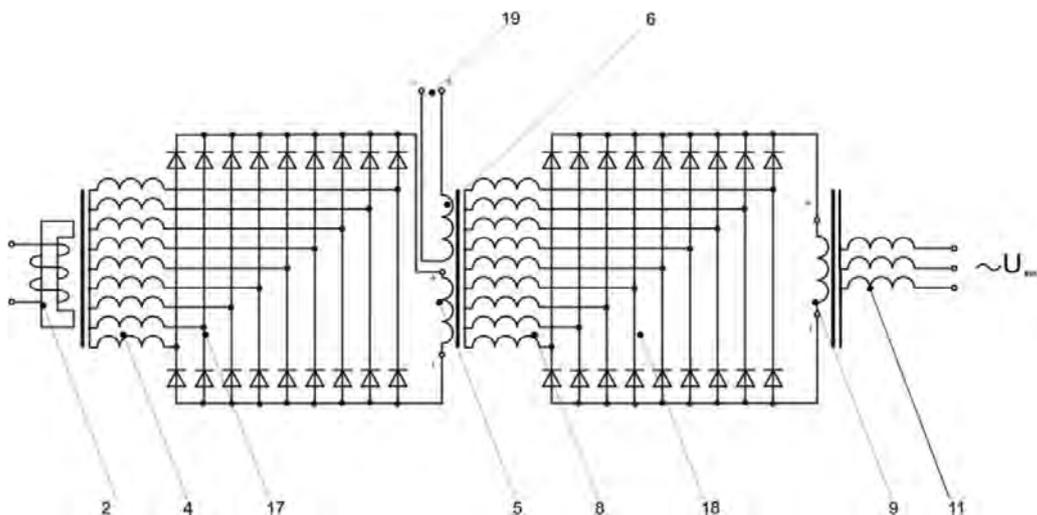


Рисунок 2 – Электрическая схема ДЭМ-Г

На рисунке 3 представлена функциональная схема гибридной системы автономного электроснабжения с использованием ДЭМ-Г. Гибридная система автономного электроснабжения с использованием ДЭМ-Г будет работать следующим образом. При достаточной освещенности солнечных батарей (весенне-летний период эксплуатации, дневное время суток – солнечная погода, умеренный ветер) на солнечных батареях (СБ) и ветрогенераторе формируется достаточное количество энергии для питания нагрузки и заряда блока аккумуляторных батарей (АКБ). Для контроля накопления электроэнергии в

АКБ в состав системы входит контроллер заряда/разряда. После полного заряда АКБ контроллер прекращает подачу электроэнергии с СБ. Далее полученная электроэнергия с СБ и ветрогенератора либо АКБ поступает на ДЭМ-Г, где происходит преобразование постоянного напряжения в переменное и поступление его к потребителю. При недостаточной освещенности (ночь, пасмурная погода, отсутствие ветра) и достаточной степени заряда АКБ, система осуществляет электроснабжение от блока АКБ с последующим преобразованием постоянного напряжения в переменное через ДЭМ-Г и подачу его потребителю. В случае, когда освещенности недостаточно и отсутствует ветер, электроснабжение осуществляется от дизель-генератора (ДГ), одновременно производя зарядку блока АКБ. Когда блок АКБ полностью будет заряжен, система управления автозапуском/автоотключением ДГ отключает ДГ и энергоснабжение осуществляется от блока АКБ до полной его разрядки. Если погодные условия не изменились, то процесс повторяется.

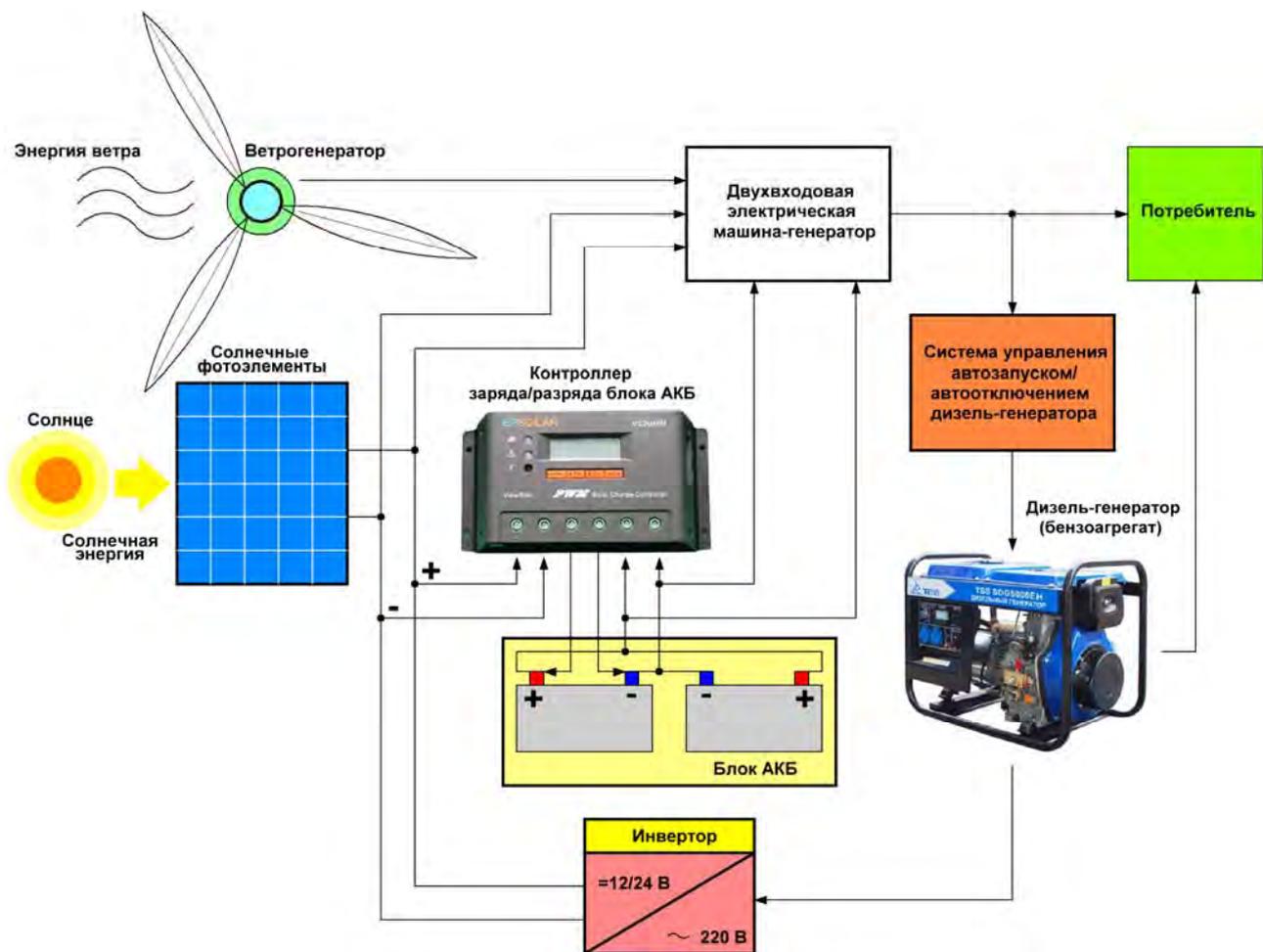


Рисунок 3 – Функциональная схема гибридной системы автономного электроснабжения с использованием ДЭМ-Г

Для проведения анализа работы ДЭМ-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 $u - v - w$) [7].

Следует отметить, что симметричную многофазную электрическую машину с синусоидальным напряжением на ее обмотках удобно анализировать, приведя ее к двухфазной. Математическую модель ДЭМ-Г построим при следующих допущениях [8]: ДЭМ-Г геометрически симметрична, то есть обмотки расположены равномерно; ДЭМ-Г электрически симметрична, то есть активные сопротивления и индуктивности обмоток по осям одинаковы; ДЭМ-Г магнитно симметрична, то есть потокосцепления постоянных магнитов равны; в листах стали магнитопровода нет разъемов и стыков.

При составлении математической модели ДЭМ-Г машину для наглядности условно разбиваем на отдельные части, которые затем объединяем в единое целое с учетом потокосцеплений. Такими частями в электромагнитном отношении являются (рисунки 1, 2, 4): 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 рисунке 4 приведены пространственные модели отдельных частей машины в привязке к осям $\alpha - \beta$. На рисунке 3 обозначено: ПМ – постоянный магнит, М3, М7, М10 – аксиальные магнитопроводы 3, 7 и 10 в соответствии с рисунками 1, 2. Система координатных осей жестко связана со статором, ротор с обмотками вращается со скоростью ω_p [8].

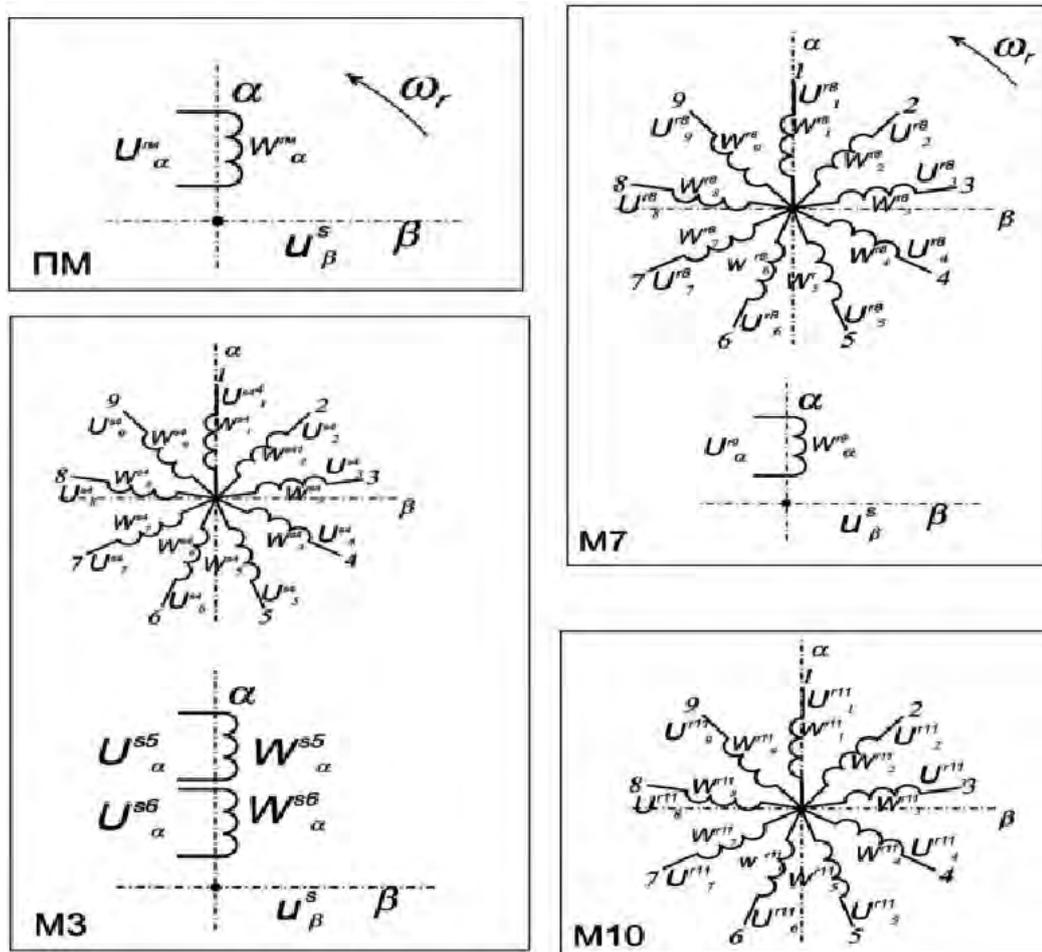


Рисунок 4 – Пространственная модель ДЭМ-Г

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

$$\begin{cases} U_B^{IM} = R_B^{IM} \cdot i_B^{IM} + \frac{d\psi_B^{IM}}{dt}; \\ -U_\alpha^{s4} = R_\alpha^{s4} \cdot i_\alpha^{s4} + \frac{d\psi_\alpha^{s4}}{dt} + \omega_p \cdot \psi_\alpha^{s4}; \\ U_\beta^{s4} = R_\beta^{s4} \cdot i_\beta^{s4} + \frac{d\psi_\beta^{s4}}{dt} - \omega_p \cdot \psi_\beta^{s4}. \end{cases} \quad (1)$$

Потокосцепления в (1) получим из выражений:

$$\begin{cases} \psi_B^{IM} = L_B^{IM} \cdot i_B^{IM} + M_1 \cdot i_\alpha^{s4}; \\ \psi_\alpha^{s4} = L_\alpha^{s4} \cdot i_\alpha^{s4} + M_1 \cdot i_B^{IM}; \\ \psi_\beta^{s4} = L_\beta^{s4} \cdot i_\beta^{s4}. \end{cases} \quad (2)$$

Выпрямленное напряжение на обмотке 5 возбуждения возбудителя будет иметь вид:

$$\begin{cases} U_d^{s5} = \frac{1}{T} \int_0^T U_\alpha^{s4} dt; \\ U_d^{s5} = 3,1 \cdot U_\alpha^{s5}. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения напряжений на обмотках возбудителя 5, 6 и 8:

$$\begin{cases} U_d^{s5} = R^{s5} \cdot i_5; \\ U^{s6} = R_\alpha^{s6} \cdot i_\alpha^{s6} + \frac{d\psi^{s6}}{dt}; \\ -U_\alpha^{r8} = R_\alpha^{r8} \cdot i_\alpha^{r8} + \frac{d\psi_\alpha^{r8}}{dt} + \omega_p \cdot \psi_\alpha^{r8}; \\ -U_\beta^{r8} = R_\beta^{r8} \cdot i_\beta^{r8} + \frac{d\psi_\beta^{r8}}{dt} - \omega_p \cdot \psi_\beta^{r8}. \end{cases} \quad (4)$$

Потокосцепления в (4) получим из выражений:

$$\begin{cases} \psi^{s5} = L^{s5} \cdot i^{s5} + M_2 \cdot i^{s6} + M_2 \cdot i_\alpha^{r8}; \\ \psi^{s6} = L^{s6} \cdot i^{s6} + M_2 \cdot i^{s5} + M_2 \cdot i_\alpha^{r8}; \\ \psi_\alpha^{r8} = L_\alpha^{r8} \cdot i_\alpha^{r8} + M_2 \cdot i^{s5} + M_2 \cdot i^{s6}; \\ \psi_\beta^{r8} = L_\beta^{r8} \cdot i_\beta^{r8}. \end{cases} \quad (5)$$

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

$$\begin{cases} i_1^{s8} = i_\alpha^8; i_2^{s8} = \frac{i_\alpha^8}{\cos \varphi_1} = \frac{i_\beta^8}{\cos 1,25\varphi_1}; i_3^{s8} = \frac{i_\alpha^8}{\cos 2\varphi_1} = \frac{i_\beta^8}{\cos 0,25\varphi_1}; \\ i_4^{r8} = \frac{i_\alpha^8}{\cos 1,5\varphi_1} = \frac{i_\beta^8}{\cos 0,75\varphi_1}; i_5^{r8} = \frac{i_\alpha^8}{\cos 0,5\varphi_1} = \frac{i_\beta^8}{\cos 1,75\varphi_1}; \\ i_6^{r8} = -\frac{i_\alpha^8}{\cos 0,5\varphi_1} = -\frac{i_\beta^8}{\cos 1,75\varphi_1}; i_7^{r8} = -\frac{i_\alpha^8}{\cos 1,5\varphi_1} = -\frac{i_\beta^8}{\cos 0,75\varphi_1}; \\ i_8^{r8} = \frac{i_\alpha^8}{\cos 2\varphi_1} = -\frac{i_\beta^8}{\cos 0,25\varphi_1}; i_9^{r8} = \frac{i_\alpha^8}{\cos \varphi_1} = -\frac{i_\beta^8}{\cos 1,25\varphi_1}. \end{cases} \quad (6)$$

Выпрямленное напряжение на обмотке 9 возбуждения генератора:

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

Уравнения напряжений на обмотках 9 и 11 основного генератора:

$$\begin{cases} U_d^{r9} = R^{r9} \cdot i^{r9} + \frac{d\psi^{r9}}{dt}; \\ -U_\alpha^{s11} = R_\alpha^{s11} \cdot i_\alpha^{s11} + \frac{d\psi_\alpha^{s11}}{dt} + \omega_p \cdot \psi_\alpha^{s11}; \\ -U_\beta^{s11} = R_\beta^{s11} \cdot i_\beta^{s11} + \frac{d\psi_\beta^{s11}}{dt} - \omega_p \cdot \psi_\beta^{s11}. \end{cases} \quad (8)$$

Потокосцепления в (8) получим из выражений:

$$\begin{cases} \psi^{r9} = L^{r9} \cdot i^{r9} + M_3 \cdot i_\alpha^{s11}; \\ \psi_\alpha^{s11} = L_\alpha^{s11} \cdot i_\alpha^{s11} + M_3 \cdot i^{r9}; \\ \psi_\beta^{s11} = L_\beta^{s11} \cdot i_\beta^{s11}. \end{cases} \quad (9)$$

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 рисунками 1, 2, 4; U_α^{si} , U_β^{si} , i_α^{si} , i_β^{si} , R_α^{si} , R_β^{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 α - β ; ω_p – угловая скорость вращения ротора (постоянного многополюсного магнита 2 и магнитопровода 7) (рисунки 1, 2, 4); $M1$ – взаимная индуктивность обмотки возбуждения и девятифазной обмотки 4 якоря подвозбудителя; $M2$ – взаимная индуктивность обмоток 5 и 6 возбуждения и девятифазной обмотки 8 якоря возбудителя; $M3$ – взаимная индуктивность обмотки 9 возбуждения и девятифазной обмотки 11 якоря основного генератора; $\varphi_1 = 2\pi / m_2$ – 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.

$$\begin{cases} i_1^{s11} = i_\alpha^{11}; i_2^{s11} = \frac{i_\alpha^{11}}{\cos \varphi_1} = \frac{i_\beta^{11}}{\cos 1,25\varphi_1}; i_3^{s11} = \frac{i_\alpha^{11}}{\cos 2\varphi_1} = \frac{i_\beta^{11}}{\cos 0,25\varphi_1}; \\ i_4^{s11} = \frac{i_\alpha^{11}}{\cos 1,5\varphi_1} = \frac{i_\beta^{11}}{\cos 0,75\varphi_1}; i_5^{s11} = \frac{i_\alpha^{11}}{\cos 0,5\varphi_1} = \frac{i_\beta^{11}}{\cos 1,75\varphi_1}; \\ i_6^{s11} = -\frac{i_\alpha^{11}}{\cos 0,5\varphi_1} = -\frac{i_\beta^{11}}{\cos 1,75\varphi_1}; i_7^{s11} = -\frac{i_\alpha^{11}}{\cos 1,5\varphi_1} = -\frac{i_\beta^{11}}{\cos 0,75\varphi_1}; \\ i_8^{s11} = \frac{i_\alpha^{11}}{\cos 2\varphi_1} = -\frac{i_\beta^{11}}{\cos 0,25\varphi_1}; i_9^{s11} = \frac{i_\alpha^{11}}{\cos \varphi_1} = -\frac{i_\beta^{11}}{\cos 1,25\varphi_1}. \end{cases} \quad (10)$$

Уравнения динамики механической части ДЭМ-Г имеют вид уравнений равновесия моментов (11), где: где M_Δ – 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 ω_p , p – число пар полюсов ДЭМ-Г.

$$\begin{cases} M_{\ominus} = M_C + J \frac{d\omega_p}{dt}; \\ M_{\ominus} = \left[M_1 \cdot (i_B^{IB} \cdot i_{\alpha}^{s4}) - M_2 \cdot (i^{s5} \cdot i_{\beta}^{r8} + i^{s6} \cdot i_{\beta}^{r8}) + M_3 \cdot (i^{r9} \cdot i_{\beta}^{s11}) \right] \cdot p; \\ M_C = a \cdot \omega_p^b + c \cdot \omega_p^b + n. \end{cases} \quad (11)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермак А. А., Самородов А.В., Копелевич М.Л. Перспективные источники для автономных систем электроснабжения на базе возобновляемых источников / Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8 (1). – С. 39-41.
2. Нетрадиционные электромеханические преобразователи комплексного использования возобновляемых источников энергии / Интернет-сайт: <http://www.elec.ru>.
3. Гайтов Б.Х., Гайтова Т.Б., Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В. Нетрадиционные электромеханические преобразователи энергии в системе автономного электроснабжения// Изв. ВУЗов Электромеханика. – 2008.- №1.- С. 21-28.
4. Пат. 2450411 РФ – Аксиальная двухходовая бесконтактная электрическая машина-генератор / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., Голощанов А.В. Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.
5. Gaytov B.Kh., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kashin Ya.M. The two-way Generator for self-contained supply systems. Construction and characteristics / Global Science and Innovation: MATERIALS OF THE V INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE. – 2015. – с.340-344.
6. Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Нетрадиционные электротехнические комплексы (теория, расчет, конструкции). Монография. – Краснодар, КВАИ, 2004.
7. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высшая школа, 1994. - 321 с.
8. Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Копелевич М.Л., Голованов А.А. Разработка математической модели электромагнитных и электромеханических переходных процессов в аксиальных многофазных генераторных установках / Научный журнал КубГАУ, №76(02). – 2012.