УДК 621.313

А.Н*. *ПЕТРЕНКО, канд. техн. наук, ассистент, НТУ "ХПИ"
Н.Я*. *ПЕТРЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"
В.П. ШАЙДА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОТРАКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В ПРЕОБРАЗОВАННЫХ КООРДИНАТАХ

В статье рассмотрены вопросы усовершенствования математической модели пятифазного автотракторного генератора с комбинированным возбуждением в преобразованных координатах. Полученные выражения для математической модели дают возможность анализировать работу генератора в стационарных и динамических режимах.

Ключевые слова: усовершенствованная математическая модель, пятифазній автотракторній генератор, стационарные и динамические режимы.

Введение. Энерговооруженность современных сельхозмашин и автомобилей постоянно растет, что требует повышения единичной мощности автотракторных генераторов. Сложные условия эксплуатации автотракторных установок, связанные с повышенными вибрациями, ограничениями по массогабаритным показателям, значительными перепадами температуры и влажности окружающей среды, трудностями проведения профилактики и ремонта, предъявляют к этим установкам ряд специфических требований. К этим требованиям относятся: высокая надежность, обеспечивающая срок службы не менее 7000 моточасов до первого ремонта; минимальная потребность в техническом обслуживании; удовлетворительная работа в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды; стабильность напряжения бортовой сети при переменной частоте вращения и нагрузке генератора; возможность эксплуатации при отсутствии аккумуляторной батареи для обеспечения возможности самовозбуждения; высокая технологичность и относительная дешевизна в условиях массового производства [1].

Ряд из перечисленных выше требований противоречат друг другу, поэтому проектирование автотракторных генераторов требует принятия определенных компромиссов для получения оптимального решения. Применение электромагнитной обмотки возбуждения расположенной на статоре, а также постоянных магнитов для получения дополнительной МДС возбуждения, позволяет регулировать величину напряжения и обеспечить самовозбуждение генератора. Электромагнитные и электромеханические переходные процессы принимаем как единую электродинамическую систему, которая состоит из совокупности электрических контуров и вращающихся масс. Поведение такой системы в переходном процессе опишем системой дифференциальных уравнений напряжения контуров и уравнением моментов сил действующих на ротор [2]. В работе [3] получена сложная система уравнений с периодическими коэффициентами (полные потокосцепления контура, которые зависят от положения ротора).

Разработка математической модели. В работе, с целью упрощения системы уравнений, предложено преобразовать ее к системе координат d, q, что дает возможность получить систему с постоянными коэффициентами. В общем случае преобразования к осям ротора d, q дифференциальных уравнений для контуров статора m-фазной машины осуществляется, например, для токов по следующим соотношениям [4]:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{m}\left(i_a \cos\nu + i_b \cos(\nu - \alpha_m) + \cdots + i_m \cos(\nu - (m-1)\alpha_m)\right); \\ i_q &= \frac{2}{m}\left(i_a \sin\nu + i_b \sin(\nu - \alpha_m) + \cdots + i_m \sin(\nu - (m-1)\alpha_m)\right), \end{aligned} \tag{1}$$

где ν – угол между осью фазы и продольной осью ротора; α_m – угол сдвига фаз статора, $\alpha_m = \dfrac{2\pi}{5}$.

Систему уравнений для контура статора генератора, записанную в фазных координатах представим в матричном виде:

$$|U| = r_1|i| + \frac{d}{dt}|\psi|, \tag{2}$$

где матрицы мгновенных значений величин имеют вид:

$$|U| = \begin{vmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ U_D \\ U_E \end{vmatrix}; \quad |i| = \begin{vmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_D \\ i_E \end{vmatrix}; \quad |\psi| = \begin{vmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_D \\ \psi_E \end{vmatrix}. \tag{3}$$

Для получения системы (2) в осях d, q используем матрицу преобразования для 5-ти фазной машины, которая аналогична матрице для трехфазной машины [5]:

$$\left|M_{П}\right| = \frac{2}{5}\begin{vmatrix} \cos z_2\nu_A & \cos z_2\left(\nu_A - \frac{2\pi}{5}\right) & \cos z_2\left(\nu_A - \frac{4\pi}{5}\right) & \cos z_2\left(\nu_A + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos z_2\left(\nu_A + \frac{2\pi}{5}\right) \\ -\sin z_2\nu_A & -\sin z_2\left(\nu_A - \frac{2\pi}{5}\right) & -\sin z_2\left(\nu_A - \frac{4\pi}{5}\right) & -\sin z_2\left(\nu_A + \frac{4\pi}{5}\right) & -\sin z_2\left(\nu_A + \frac{2\pi}{5}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} \quad (4)$$

Умножив почленно (2) на матрицу преобразования $|M_П|$, получим:

$$\left|M_{\ddot{I}}\right| \cdot \left|U\right| = r_1 \cdot \left|M_{\ddot{I}}\right| \cdot \left|i\right| + \left|M_{\ddot{I}}\right| \cdot \left|\frac{d\psi}{dt}\right|.$$

Преобразования для токов:

$$\left|M_{П}\right|\left|i\right| = \frac{2}{5}\begin{vmatrix} i_A\cos z_2\nu_A & i_B\cos z_2\left(\nu_A - \frac{2\pi}{3}\right) & i_C\cos z_2\left(\nu_A - \frac{4\pi}{5}\right) & i_D\cos z_2\left(\nu_A + \frac{4\pi}{5}\right) & i_E cos z_2\left(\nu_A + \frac{2\pi}{5}\right) \\ -i_A\sin z_2\nu_A & -i_B\sin z_2\left(\nu_A - \frac{2\pi}{3}\right) & -i_C\sin z_2\left(\nu_A - \frac{4\pi}{5}\right) & -i_D\sin z_2\left(\nu_A + \frac{4\pi}{5}\right) & -i_E\sin z_2\left(\nu_A + \frac{2\pi}{5}\right) \\ \frac{i_A}{2} & \frac{i_B}{2} & \frac{i_C}{2} & \frac{i_D}{2} & \frac{i_E}{2} \end{vmatrix} \quad (5)$$

Произведение указанных матриц дает возможность получить преобразованные токи в осях d, q:

$$\left|M_{П}\right|\left|i\right| = \left|i_{П}\right| = \begin{vmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Аналогичное преобразование получим для напряжений.

Определим производную от произведения матриц:

$$\frac{d}{dt}\left(\left|M_{П}\right|\left|\varphi\right|\right) = \frac{d}{dt}\left(\left|M_{П}\right|\left|\varphi\right| + \left|M_{П}\right|\frac{d}{dt}\left(\left|\varphi\right|\right)\right). \quad (7)$$

Из этого соотношения получим:

$$\left|M_{П}\right|\frac{d}{dt}\left(\left|\varphi\right|\right) = \frac{d}{dt}\left(\left|M_{П}\right|\left|\varphi\right|\right) - \left|M_{П}\right|\frac{d}{dt}\left(\left|M_{П}\right|\right)\left|\varphi\right|. \quad (8)$$

По аналоги с (5), (6) получим преобразование потокосцепления:

$$\left|M_{П}\right|\left|\psi\right| = \left|\psi_{П}\right| = \begin{vmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Определим производную от матрицы преобразования:

$$\frac{d}{dt}\left|M_П\right| = -\frac{2}{5}\omega\begin{vmatrix} \sin z_2\nu_A & \sin z_2\left(\nu_A-\frac{2\pi}{5}\right) & \sin z_2\left(\nu_A-\frac{4\pi}{5}\right) & \sin z_2\left(\nu_A+\frac{4\pi}{5}\right) & \sin z_2\left(\nu_A+\frac{2\pi}{5}\right) \\ \cos z_2\nu_A & \cos z_2\left(\nu_A-\frac{2\pi}{5}\right) & \cos z_2\left(\nu_A-\frac{4\pi}{5}\right) & \cos z_2\left(\nu_A+\frac{4\pi}{5}\right) & \cos z_2\left(\nu_A+\frac{2\pi}{5}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (10)$$

где ω – угловая частота вращения ротора в электрических радианах.

Тогда:

$$\frac{d}{dt}\left(\left|M_П\right|\right)\left|\psi\right| = \omega\begin{vmatrix} \psi_d \\ -\psi_q \\ \psi_o \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Окончательно запишем:

$$\left|U_П\right| = r_1\left|i_П\right| + \frac{d}{dt}\left|\psi_П\right| - \frac{d}{dt}\left(\left|M_П\right|\right)\left|\psi\right|. \quad (12)$$

Раскрывая матрицы получим:

$$\begin{vmatrix} -U_d \\ -U_q \\ -U_o \end{vmatrix} = r_1\begin{vmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{vmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{vmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \end{vmatrix} - \omega\begin{vmatrix} \psi_q \\ -\psi_d \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Окончательно система уравнений для контуров статора в преобразованных осях d, q в развернутом виде запишем:

$$\begin{aligned} -U_d &= r_1 i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q; \\ -U_q &= r_1 i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d; \\ -U_o &= r_1 i_o + \frac{d\psi_o}{dt}. \end{aligned} \quad (14)$$

Система уравнений для контуров ротора, записанная в собственной системе координат не изменит своего вида:

$$U_f = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt};$$
$$0 = r_{эdm} i_{эdm} + \frac{d\psi_{эdm}}{dt};$$
$$0 = r_{эdm} i_{эdf} + \frac{d\psi_{эdf}}{dt}; \qquad (15)$$
$$0 = r_{эqm} i_{эq} + \frac{d\psi_{эq}}{dt}.$$

где $i_{эdm}$ – ток продольного демпфирующего контура в оси постоянного магнита; $i_{эdf}$ – ток продольного демпфирующего контура в оси обмотки возбуждения.

В преобразованных осях потокосцепления контуров статора и ротора будут иметь вид:

$$\psi_d = L_d i_d + M_{Af} i_f + M_{Aэd} i_{эdf} + M_{Aэdm} i_{эdm} + M_{Am} I_m';$$
$$\psi_q = L_q i_q + M_{Aэq} i_{эq};$$
$$\psi_f = L_f i_f + \frac{5}{2} M_{Af} i_d - M_{fэdf} i_{эdf} + M_{fэdm} i_{эdm} - M_{fm} I_m';$$
$$\psi_{эdf} = L_{эdf} i_{эdf} + \frac{5}{2} M_{Aэdf} i_d - M_{fэdf} i_f + M_{dfdm} i_{эdm} - M_{эdfm} I_m'; \qquad (16)$$
$$\psi_{эdm} = L_{эdm} i_{эdm} + \frac{5}{2} M_{Aэdm} i_d - M_{fэdf} i_f + M_{dfdm} i_{эmf} - M_{эdmm} I_m';$$
$$\psi_{эq} = L_{эq} i_{эq} + \frac{5}{2} M_{A\,эq} i_q;$$
$$\psi_o = L_o i_o.$$

где индексами эd и эq отмечена принадлежность величины к продольному или поперечному контуру.

Уравнение для эквивалентного контура магнита в преобразованных осях будет иметь вид:

$$e_m = \omega\left(L_m I_m'\right) - \frac{5}{2} M_{Am} i_d - M_{mf} i_f - M_{mэmf} i_{эmf} + M_{mэmm} i_{эdm}. \qquad (17)$$

Пространственная модель преобразованного генератора представлена на рис.

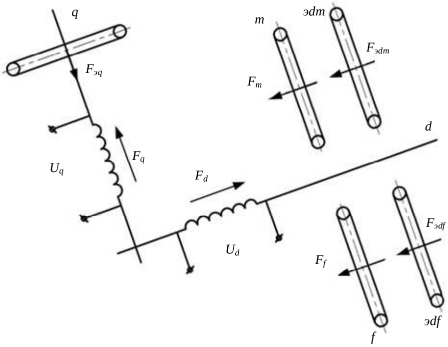

Рис. – Пространственная модель преобразованного генератора.

Решение полученной системы уравнений позволяет определить токи всех контуров генератора в переходных режимах, причем токи роторных контуров реальные, а статорных фиктивные. Для получения реальных токов в фазах статора выполним обратные преобразования по следующим соотношениям:

$$
\begin{aligned}
i_A &= i_d \cos z_2 \nu_A - i_q \sin z_2 \nu_A + i_o;\\
i_B &= i_d \cos z_2\left(\nu_A - \frac{2\pi}{5}\right) - i_q \sin z_2\left(\nu_A - \frac{2\pi}{5}\right) + i_o;\\
i_C &= i_d \cos z_2\left(\nu_A - \frac{4\pi}{5}\right) - i_q \sin z_2\left(\nu_A - \frac{4\pi}{5}\right) + i_o;\\
i_D &= i_d \cos z_2\left(\nu_A + \frac{4\pi}{5}\right) - i_q \sin z_2\left(\nu_A + \frac{4\pi}{5}\right) + i_o;\\
i_E &= i_d \cos z_2\left(\nu_A + \frac{2\pi}{5}\right) - i_q \sin z_2\left(\nu_A + \frac{2\pi}{5}\right) + i_o;
\end{aligned}
\qquad (18)
$$

Выводы. Разработанная математическая модель синхронного автотракторного генератора комбинированного возбуждения позволяет исследовать основные переходные режимы, которые имеют место в условиях эксплуатации генератора. Наиболее важным из переходных режимов является режим внезапного короткого замыкания из режима холостого хода, причем наиболее опасным является режим симметричного внезапного короткого замыкания. Исследования этих режимов необходимы для расчета ударного тока (коэффициентов ударности) и тока установившегося короткого замыкания. Величины этих токов оказывают существенное влияние на массогабаритные показатели автотракторного генератора комбинированного возбуждения.

Список литературы: **1.** *Акимов С.В., Акимов А.В., Лейкин Л.П.* Генераторы зарубежных автомобилей. – М.: За рулем, № 2, 1997. **2.** *Важнов А.И.* Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. **3.** *Петренко А.Н.* Математическая модель автотракторного генератора с комбинированным возбуждением / *А.Н. Петренко, В.Н. Иваненко, Н.А. Осташевский* // Электротехника и электромеханика. – 2002. - № 1. - С. 61-65. **4.** *Трещев И.И.* Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. **5.** *Горев А.А.* Переходные процессы синхронных машин. – М.:, Л.: Госэнергоиздат, 1950.

Поступила в редколлегию 25.04.2013

Петренко Александр Николаевич, канд. техн. наук, ассистент кафедры электрических машин, НТУ "ХПИ"

Петренко Николай Яковлевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрических машин, НТУ "ХПИ"

Шайда Виктор Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедры электрических машин, НТУ "ХПИ".
E-mail: viktorshayda08@rambler.ru

УДК 621.313

Математическая модель автотракторного генератора комбинированного возбуждения в преобразованных координатах / Петренко А.Н., Петренко Н.Я., Шайда В.П. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 35 (1008). – С. 41-48. Бібліогр.: 5 назв.

У статті розглянуті питання удосконалення математичної моделі п'ятифазного автотракторного генератора з комбінованим збудженням в перетворених

координатах. Отримані вирази для математичної моделі дають можливість аналізувати роботу генератора в стаціонарних і динамічних режимах.

Ключові слова: удосконалена математична модель, пятифазній автотракторній генератор, стаціонарні і динамічні режими.

In the paper problems of improvement of a mathematical model of a five-phase generator with combination excitation for cars and tractors in transformed coordinated are considered. Obtained expressions for the mathematical model permit to analyse the generator operation in stationary and dynamical modes.

Keywords: generator with combination excitation for cars and tractors, mathematical model, stationary and dynamical modes.