

УРАВНЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С СИНХРОННЫМ ВРАЩЕНИЕМ РОТОРА

Расчёт электромагнитных процессов в электрических машинах с полупроводниковым коммутатором можно проводить методом мгновенных и усреднённых значений переменных. При этом, для упрощения исследования удобным представляется применение комплексного преобразования переменных [1].

В двигателе постоянного тока с синхронным вращением ротора в зависимости от моментов подачи управляющих импульсов на тиристорные переключатели происходит периодическое переключение фаз обмотки статора. В каждом отдельном интервале времени двигатель находится в несимметричном режиме.

В течение определённого времени с изменением начальных условий переходный процесс меняется от интервала к интервалу времени. После определённого времени начальные условия периодически повторяются и переходный процесс устанавливается, и в этом режиме достаточно рассмотреть интервал повторяемости процесса.

После поворота ротора двигателя на угол $\frac{\pi}{3}$ эл. рад. магнитная ось фазы статора скачком поворачивается в пространстве на угол $\frac{\pi}{3}$. Для изучения электромагнитных процессов в двигателе требуется для каждого отдельного интервала составить дифференциальные уравнения. Решение этих уравнений даст значения токов и напряжений на отдельных элементах схемы. Сопрягая эти решения с учётом граничных условий, получим закон изменения величин на конечном временном участке. Энергетический процесс в машине можно характеризовать входным током машины i^c . Коммутационные процессы оказывают незначительное влияние на ток i^c , если во входной цепи коммутатора включен сглаживающий дроссель. В результате чего можно составлять дифференциальные уравнения относительно токов i^c , i^p - для одного интервала.

Это значит, что обмотка статора приводится к одной эквивалентной фазе. Переключение обмотки учитывается соответствующим законом изменения угла α^c . Здесь угол α^c пространственный сдвиг между магнитными осями эквивалентной фазы и первой фазы машины. Приведение обмотки статора к одной эквивалентной фазе с учетом переключения по сути дела есть преобразование переменных по оси входного тока коммутатора. Скачкообразное изменение угла α^c от интервала к интервалу записывается следующим образом:

$$\alpha^c = \alpha_0^c + (n-1)\frac{\pi}{3}, \text{ где } \alpha_0^c - \text{начальный пространственный угол, } n - \text{номер интервала (} n=1, 2, 3, \dots \text{)}.$$

Используя комплексное преобразование переменных, уравнения электрического равновесия фаз обмоток статора и ротора, относительно мгновенных значений переменных, после некоторых преобразований получим комплексные уравнения относительно результирующих величин [2].

$$\begin{aligned} \dot{U}^c &= R^c i^c + \frac{d\psi^c}{dt} + j\omega_p \psi^c, \\ \dot{U}^p &= R^p i^p + \frac{d\psi^p}{dt}, \quad J \frac{d\omega_p}{dt} = M_\alpha - M_B, \\ \psi^c &= \left[\frac{2}{3} X_s^c + X_m^{cc} + X_0 \cos 2(Q_p - \alpha^c) \right] i^c + \frac{1}{2} X_m^{cp} \left[1 + e^{-j2(Q_p - \alpha^c)} \right] i^p, \\ \psi^p &= (X_s^p + X_m^{pp}) i^p + \frac{1}{2} X_m^{pc} (i^c + i^{*c}) \end{aligned} \tag{1}$$

где $R^c = \frac{2}{3} r^c$

Из выражений (1) можно получить скалярные уравнение для составляющих токов, напряжений и потокосцеплений по осям d и q с целью дальнейшего решения задачи на ЭВМ. Уравнения в координатных d и q имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
U_d^c &= R^c I_d^c + \frac{d\Psi_d^c}{dt} - \omega_p \Psi_q^c, \\
U_q^c &= R^c I_q^c + \frac{d\Psi_q^c}{dt} + \omega_p \Psi_d^c, \\
U^p &= R^p i^p + \frac{d\Psi^p}{dt}, \\
J \frac{d\omega_p}{dt} &= M_s - M_B, \\
M_s &= (X_d - X_q) I_d^c I_q^c + \frac{3}{2} X_r^{cp} I_d^p I_q^c, \\
\Psi_d^c &= X^c I_d^c + X_1^{cp} i^p, \\
\Psi_q^c &= X^c I_q^c - X_2^{cp} i^p, \\
\Psi^p &= X^p i^p + X_r^{pc} I_d^c, \\
X^c &= \frac{2}{3} X_s^c + X_r + X_0 \cos 2(Q_p - \alpha^c), \\
X_1^{cp} &= \frac{1}{2} X_r^{cp} [1 + \cos 2(Q_p - \alpha^c)], \\
X_2^{cp} &= \frac{1}{2} X_m^{cp} \sin 2(Q_p - \alpha^c).
\end{aligned} \tag{2}$$

Полученная система уравнений справедливо для любого момента времени между двумя последовательными переключениями.

В уравнениях (2) фигурирует угол α^c , который учитывает скачкообразное изменение положение результирующего вектора тока статора в координатной системе статора после очередной коммутации. После каждой коммутации результирующий вектор тока поворачивается на $\frac{\pi}{3}$.

В уравнениях (2) в аргументы синусов и косинусов входит разность углов $(Q_p - \alpha^c)$. Уголь поворота ротора относительно продольной оси статора Q_p является непрерывной функцией времени, а $\alpha^c = \alpha_0^c + (n-1)\frac{\pi}{3}$ меняется скачком при переходе от одного меж коммутационного интервала к другому. Если считать коммутацию тока мгновенной, тогда для изучения электромагнитных переходных процессов можно использовать уравнения (2), с учётом того, что после каждой коммутации результирующий вектор скачком поворачивается на $\frac{\pi}{3}$.

Для определения интегральных характеристик применяется метод усреднённых значений величин в сочетании с комплексным преобразованием переменных [1]. Метод позволяет исследовать электромеханические установившиеся и переходные процессы. При этом существенно упрощаются вычисления, а решение можно получить в виде для огибающей по усреднённым значениям величин внутри временного интервала.

Представим время в следующем виде:

$$t = (k-1)\Delta_{и} + \tau, \quad \Delta_{и} = \frac{\pi}{3\omega_{ис}} \tag{3}$$

$$-\frac{\Delta_{и}}{2} < \tau < \frac{\Delta_{и}}{2}, \quad (k=1, 2, 3, \dots).$$

τ - время, отсчитываемое от начала каждого интервала времени, $\omega_{ис}$ - угловая скорость вращения управляющего импульса в координатной системе статора.

После каждого интервала магнитная ось эквивалентной фазы статора поворачивается в пространстве на угол $\frac{\pi}{3}$, а в течение интервала $\Delta_{и}$ не меняет положения.

В зависимости от времени t непрерывно меняются значения величин токов, напряжении, потокосцеплений и угол поворота ротора. Мы будем считать, что в каждом интервале времени напряжение, ток, потокосцепление равны усредненному значению соответствующих мгновенных величин в этом интервале.

Уравнения переходных процессов двигателя по усредненным значениям переменных в относительных

единицах в координатах d и q после решения относительно производных примут вид, удобный для программирования на ЭВМ [2, 3].

$$\begin{aligned} \frac{dI_d^c}{dt} &= \frac{1}{\sigma} \left[\frac{1}{X^c} U_d^c - \frac{\mu^c}{X^p} U_d^p - \rho_s^c I_d^c + \mu^c (\rho^p - \rho^{cp}) I_d^p \right], \\ \frac{dI_d^p}{dt} &= -\frac{1}{\sigma} \left[\frac{\mu^p}{X^c} U_d^c - \frac{1}{X^p} U_d^p - \mu^p I_d^c - (\mu \rho^{cp} - \sigma_p^p) I_d^p \right], \\ \frac{d\omega_p}{dt} &= \frac{1}{j} (M_s - M_B), \\ I_q^c &= I_d^c \operatorname{ctg} \beta, \quad i^c = \frac{1}{\sin \beta} I_d^c, \quad i^p = I_d^p, \\ U_d^c &= U^c \sin \beta, \quad U_d^p = U^p, \\ M_s &= K_1 X_m^{cp} I_d^p I_q^c + \frac{2}{3} (X_d - X_q) K_2 I_d^c I_q^c, \\ X^c &= \frac{2}{3} X_s^c + X_m - K_2 X_0 \cos 2\beta + X_\delta, \\ X^p &= X_s^p + X_m^{pp}, \quad X_{11}^{pc} = X_m, \\ X_{11}^{cp} &= \frac{1}{2} X_m^{cp} (1 - \cos 2\beta), \\ \rho_s^c &= \frac{R^c + 2\omega_p K_2 X_0 \sin 2\beta}{X^c}, \\ \rho^p &= \frac{r^p}{X^p}, \\ \rho^{cp} &= \omega_p \operatorname{tg} \beta, \quad X_0 = \frac{1}{3} (X_d - X_2), \\ R^c &= \frac{2}{3} r^c + R_\delta, \quad \mu^c = \frac{K_1 \cdot X_{11}^{cp}}{X^c}, \quad \mu^p = \frac{K_1 X_{11}^{pc}}{X^p}, \\ \mu &= \mu^c \cdot \mu^p, \quad \sigma = 1 - \mu, \quad K_1 = 0,955, \quad K_2 = 0,826. \end{aligned} \tag{4}$$

где $\beta = \pi - \alpha_0$ - угол опережения открывания коммутатора; R_δ , X_δ - соответственно активное и индуктивное сопротивления, включенные на входе коммутатора;

μ^c - коэффициент магнитной связи статорной обмотки; μ^p - коэффициент магнитной связи роторной обмотки; μ - коэффициент магнитной связи обмоток статора и ротора; δ - коэффициент магнитного рассеяния.

Литература:

- [1] Лутидзе Ш. И. Основы теории электрических машин с управляемым полупроводниковым коммутатором. М. Наука, 1968. 303 с.
- [2] Лутидзе Ш. И., Кохреидзе Т.К., Кохреидзе Д.К., Кутателадзе Э. Ш. Бесконтактные электрические двигатели постоянного тока. Тбилиси. Сабчота Сакартвело, 1986. 203с.
- [3] Кохреидзе Д.К., Кохреидзе Г.К., Чурсин В.И., Блохин А.И. Исследование коммутационных процессов в двигателе постоянного тока с синхронным вращением ротора. Сб. Режимы и устойчивость электромашинно-вентильных систем. Изд-во ЭНИН а, М.: 1974, вып. II. 52-65 с.