

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВИБРОВОЗМУЩАЮЩИХ СИЛ

А. В. Беспалов

Электрическая машина представляет собой совокупность деталей, выполненных из различных материалов, имеющих различную конфигурацию и обладающих различными физическими свойствами. В процессе работы элементы этой сложной колебательной системы вибрируют. Силы, вызывающие вибрацию электрической машины, можно разделить на силы электромагнитного, механического и аэродинамического происхождения.

Вибровозмущающие силы электромагнитной природы определяются при взаимодействии магнитных полей в воздушном зазоре между статором и ротором с токами обмоток машины, демпферными контурами и элементами магнитопровода. Минимум вибровозмущающих воздействий соответствует синусоидальному распределению магнитной индукции вдоль воздушного зазора и синусоидальному напряжению питания.

По направлению действия силы подразделяются на аксиальные, радиальные и тангенциальные, оказывающие разное воздействие на электрическую машину. Основные характеристики сил – амплитуда, временная и пространственная частоты. В качестве пространственной частоты может использоваться порядок или номер пространственной гармоники.

Рассмотрим анализ переходных процессов на примере асинхронного двигателя. Как известно, классическая система уравнений в фазных координатах, описывающая асинхронную машину, в канонической форме представлена системой алгебраических и дифференциальных уравнений [2, 3]:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = U - RI, \\ \Psi = MI, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_E - M_C), \\ \frac{d\Theta}{dt} = \omega, \\ M_E = \frac{dW_E}{d\Theta}, \\ W_E = \frac{1}{2}[\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \Psi_C i_C + \Psi_a i_a + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c]. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь

Ψ – вектор полных потокоцеплений всех фаз статора и ротора,
 $\Psi = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C \ \Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$;

U – вектор фазных напряжений, приложенных к обмоткам статора и к обмоткам ротора,
 $U = [u_A \ u_B \ u_C \ u_a \ u_b \ u_c]^T$;

R – диагональная матрица активных сопротивлений фаз статора (R_A, R_B, R_C) и ротора (R_a, R_b, R_c);

I – вектор мгновенных значений токов, протекающих по обмоткам статора и ротора,
 $I = [i_A \ i_B \ i_C \ i_a \ i_b \ i_c]^T$;

M – матрица собственных и взаимных индуктивностей;

Θ – геометрический угол поворота ротора;

ω – угловая скорость ротора; J – приведенный момент инерции;

M_C – механический момент сопротивления на валу;

M_E – электромагнитный момент, создаваемый асинхронной машиной и определяющийся как частная производная от общего запаса электромагнитной энергии W_E машины по геометрическому углу поворота ротора.

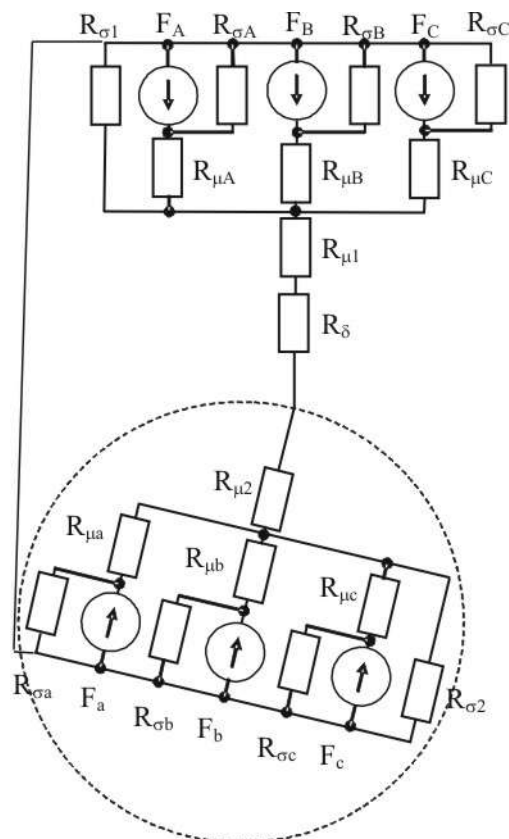


Рис. 1. Магнитная схема замещения асинхронной машины

Магнитная схема машины содержит конечное число магнитных сопротивлений (обычно выделяют магнитные сопротивления различных частей магнитопровода R_{μ} , магнитные сопротивления рассеяния обмоток R_{σ} и магнитное сопротивление воздушного зазора R_{δ}), определяющих потокоцепления обмоток (рис. 1), что в конечном счете позволяет получать выражения для матрицы потокоцеплений M [1, 2].

При наличии зубцов на статоре и гладком роторе индукция в воздушном зазоре является периодической функцией с периодом, соответствующим зубцовому делению статора.

Магнитная проводимость этого участка магнитной цепи определяется выражением:

$$\begin{cases} \Lambda_{\mu 1} = \left(1 - \beta_1 - \beta_1 \cdot \cos\left(\pi \frac{\alpha_1}{0,8\alpha_0}\right)\right) \Lambda_{1\max} & \text{при } 0 \leq \alpha_1 \leq 0,8\alpha_0, \\ \Lambda_{\mu 1} = \Lambda_{1\max} & \text{при } 0,8\alpha_0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_{z1} - 0,8\alpha_0, \\ \Lambda_{\mu 1} = \left(1 - \beta_1 - \beta_1 \cdot \cos\left(\pi \frac{\alpha_{z1} - \alpha_1}{0,8\alpha_0}\right)\right) \Lambda_{1\max} & \text{при } \alpha_1 \geq \alpha_{z1} - 0,8\alpha_0. \end{cases}$$

Здесь α – угловая координата точки определения индукции при начале координат на оси паза; α_0 – угол раскрытия паза; α_{z1} – угол, соответствующий зубцовому делению статора.

$\beta = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2B_{\max}}$ – коэффициент, определяющий уменьшение индукции над пазом.

Аналогичные выражения применимы и для зубцовой зоны ротора при гладком статоре:

$$\begin{cases} \Lambda_{\mu 2} = \left(1 - \beta_2 - \beta_2 \cdot \cos\left(\pi \frac{\alpha_2}{0,8\alpha_{02}}\right)\right) \Lambda_{2\max} \text{ при } 0 \leq \alpha_2 \leq 0,8\alpha_{02}, \\ \Lambda_{\mu 2} = \Lambda_{2\max} \text{ при } 0,8\alpha_{02} \leq \alpha_2 \leq \alpha_{z2} - 0,8\alpha_2, \\ \Lambda_{\mu 2} = \left(1 - \beta_2 - \beta_2 \cdot \cos\left(\pi \frac{\alpha_{z2} - \alpha_2}{0,8\alpha_{02}}\right)\right) \Lambda_{2\max} \text{ при } \alpha_2 \geq \alpha_{z2} - 0,8\alpha_2. \end{cases}$$

Здесь $\alpha_2 = \alpha_1 - \Theta$.

При повороте точки определения индукции (магнитного поля) на угол 2π значения магнитной проводимости в области зубцов статора и ротора суммируются. При этом статор остается неподвижным, а ротор вращается относительно поля со скоростью $s \cdot \omega$. В результате картина проводимости вдоль воздушного зазора зависит от скольжения.

В качестве иллюстрации рассчитана магнитная проводимость зубцовой зоны для асинхронного двигателя мощностью 1,5 кВт со следующими параметрами:

Число зубцов статора $Z_1 = 36$.

Ширина зубца статора $b_{z1} = 4,64 \cdot 10^{-3}$ м.

Ширина паза $b_{\Pi 1} = 6,1 \cdot 10^{-3}$ м.

Изменение индукции $\beta_1 = 0,3$.

Число зубцов ротора $Z_2 = 28$.

Ширина зубца статора $b_{z2} = 5,77 \cdot 10^{-3}$ м.

Ширина паза $b_{\Pi 2} = 4,28 \cdot 10^{-3}$ м.

Изменение индукции $\beta_1 = 0,2$.

На рис. 2 и 3 показано изменение магнитной проводимости по профилю статора и ротора.

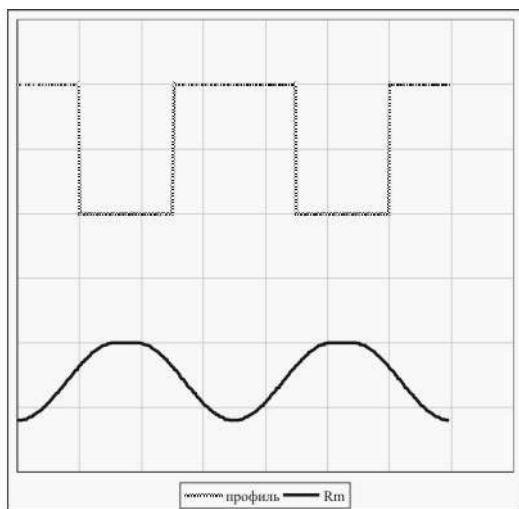


Рис. 2. Магнитная проводимость зубцовой зоны статора

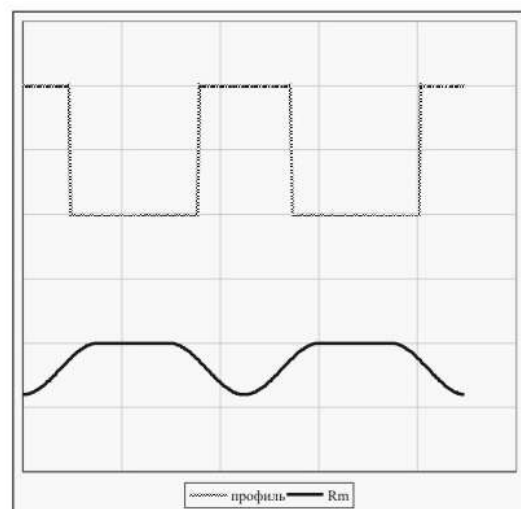


Рис. 3. Магнитная проводимость зубцовой зоны ротора

Для иллюстрации общей проводимости зубцовой зоны на рис. 4, 5, 6 приведена её картина для разных скоростей вращения ротора.

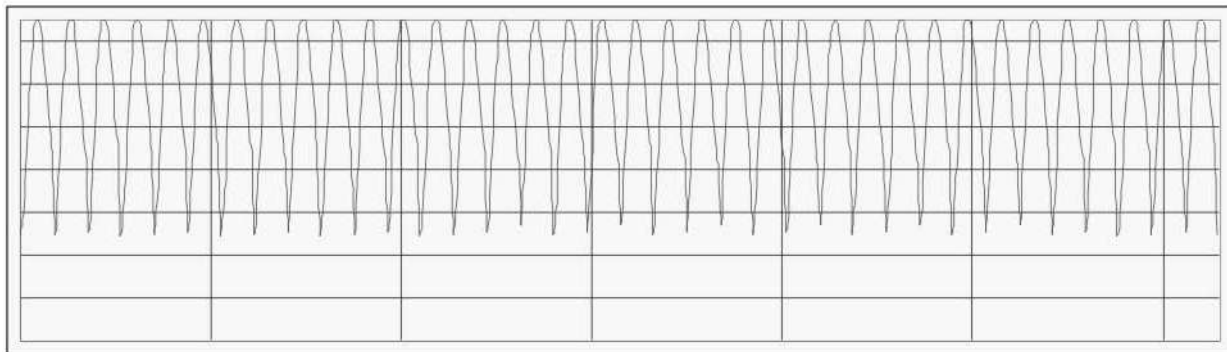


Рис. 4. Магнитная проводимость зубцовой зоны при $s = 1$

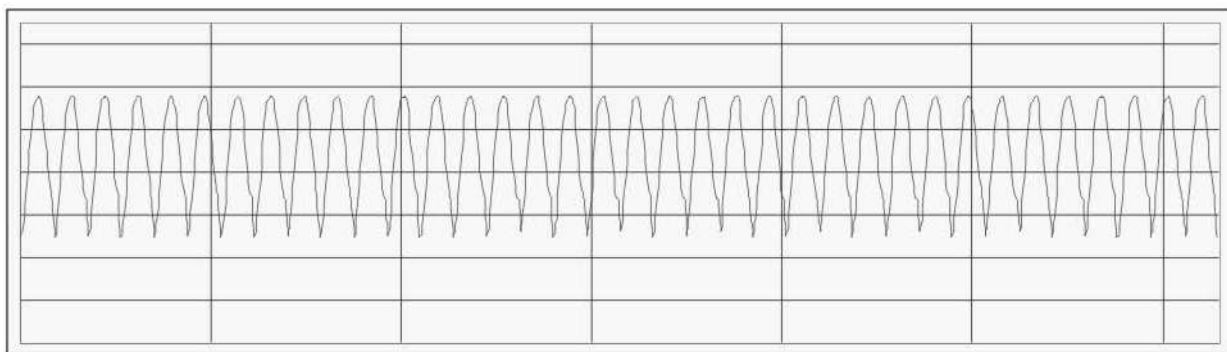


Рис. 5. Магнитная проводимость зубцовой зоны при $s = 0,1$

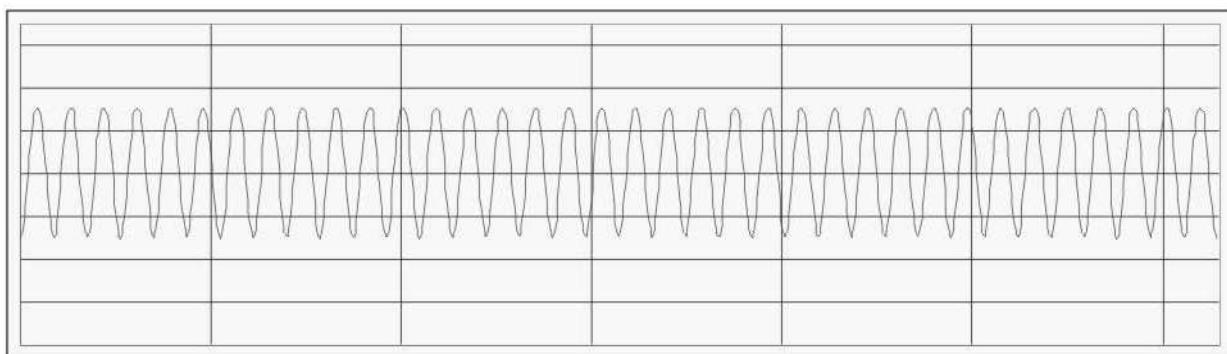


Рис. 6. Магнитная проводимость зубцовой зоны при $s = 0,01$

Как видно, неравномерность магнитной проводимости воздушного зазора существенно зависит от скольжения на начальном участке разгона двигателя, и, в меньшей степени, при нормальной работе, даже если не учитывать насыщение.

Влияние эксцентриситета ротора можно оценить, введя коэффициент ε , характеризующий смещение оси ротора относительно оси внутреннего диаметра статора, и совместив начала координат. Выражение для магнитной проводимости примет вид: $L_{\delta} = L_{\delta 0} + \varepsilon \cdot \cos \alpha$ [5].

Таким образом, магнитная проводимость в зоне воздушного зазора имеет сложный гармонический характер и, в целом, может быть представлена как функция угловой координаты ротора. В магнитной схеме замещения в этом случае достаточно, чтобы сопротивления $R_{\mu 1}$, $R_{\mu 2}$ и R_{δ} зависели от угловой координаты, то есть в конечном счете от угла поворота ротора.

В этом случае система уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = U - RI, \\ \Psi = g(I, \Theta), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{dW_E}{d\Theta} - M_C \right), \\ \frac{d\Theta}{dt} = \omega, \\ W_E = \frac{1}{2} [\Psi_{AiA} + \Psi_{BiB} + \Psi_{CiC} + \Psi_{ai_a} + \Psi_{bi_b} + \Psi_{ci_c}]. \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений такого вида может быть решена только численно. В данном случае предпочтителен выбор канонических методов [3], непосредственно применимых к моделям в форме (2). При наличии численного решения анализ потокосцеплений обмоток позволяет определить вибровозмущающие воздействия, имеющие электромагнитную природу, и вплотную подойти к расчету вибрации и шумов электрической машины. Полный анализ предполагает совместно с системой (2) разрешить уравнения механической подсистемы, упругие деформации которой и являются причиной возникновения этих явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Домбровский В. В. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования / В. В. Домбровский, В. М. Зайчик. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
2. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины : учеб. для вузов. – М. : Энергия, 1980.
3. Ковалев Ю. З. Методы решения динамических задач электромеханики на ЭЦВМ : учеб. пособ. – Омск : ОмПИ, 1984. – 84 с.
4. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 205 с.
5. Беспалов А. В. Расчет электромагнитных вибровозмущающих сил электрических машин / А. В. Беспалов, Г. В. Мальгин, А. Г. Щербаков // Омский научный вестник. – 2005. – Вып. 1. – С. 141–143.