

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

При исследовании переходных процессов в асинхронном электроприводе удобно воспользоваться уравнениями электромагнитного преобразования энергии, записанными для результирующих векторов во вращающейся системе координат [1,2]:

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 K_1 + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} + J\omega_k \bar{\psi}_1; \quad (1)$$

$$0 = \bar{I}_2 R_2 + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} + J(\omega_k - z_n) \bar{\psi}_2; \quad (2)$$

$$\bar{\psi}_1 = \bar{I}_1 L_1 + \bar{I}_2 L_m; \quad (3) \quad \bar{\psi}_2 = \bar{I}_2 L_2 + \bar{I}_1 L_m, \quad (4)$$

где $\bar{U}_1, \bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2$, – результирующие вектора напряжения, токов и потокоцеплений статора и ротора; ω_k – угловая скорость координатных осей; z_k – число пар полюсов; ω – угловая скорость ротора; $L_1 = L_m + L_{1\sigma}$; $L_2 = L_m + L_{2\sigma}$ – полная индуктивность обмоток статора и ротора; $L_m = 1.5L_0$ – взаимная индуктивность, или индуктивность от основного потока, определённая для одной фазы, которая вследствие влияния токов двух других фаз в 1,5 раза больше взаимной индуктивности одной фазы L_0 , взятой в отдельности; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора.

На основании приведенных выражений на рис. 1 представлена схема замещения асинхронного двигателя, которая справедлива для переходного и установившегося режимов, в котором производные потокоцеплений равны нулю.

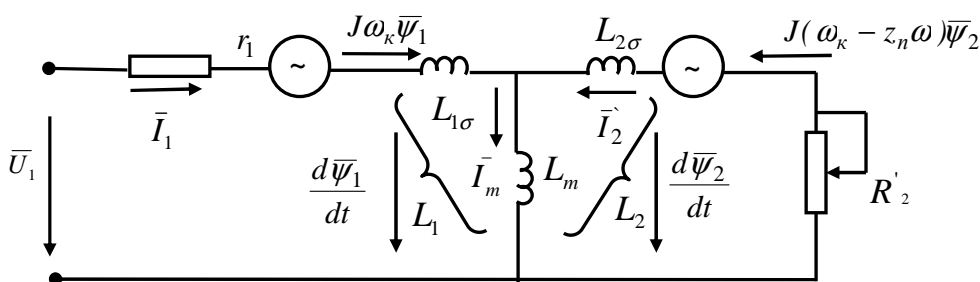


Рис. 1. Схема замещения асинхронной машины для обобщённых векторов во вращающейся системе координат

Из совместного решения (1)...(4) получим уравнения, в которых фигурируют лишь токи статора и ротора:

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + \frac{d}{dt} (L_1 \bar{I}_1 + L_m \bar{I}_2) + J\omega_k (L_1 \bar{I}_1 + L_m \bar{I}_2); \quad (5)$$

$$0 = \bar{I}_2 R_2 + \frac{d}{dt} (L_2 \bar{I}_2 + L_m \bar{I}_1) + J(\omega_k - z_n \omega) (L_2 \bar{I}_2 + L_m \bar{I}_1). \quad (6)$$

В ряде случаев для исследования динамических режимов асинхронного электропривода удобно пользоваться математическим описанием, когда в качестве неизвестных используются лишь потокосцепления статора и ротора. Из уравнений (3) и (4) можно получить выражения токов через потокосцепления:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{\psi}_1}{L_{1n}} - \frac{K_2 \bar{\psi}_2}{L_{1n}} ; \quad (7) \quad \bar{I}_2 = \frac{K_1 \bar{\psi}_1}{L_{2n}} - \frac{\bar{\psi}_2}{L_{2n}} , \quad (8)$$

где $K_1 = L_m / L_1$, $K_2 = L_m / L_2$ -коэффициенты связи обмоток статора и ротора; $L_{1n} = L_1 - L_m^2 / L_2$; $L_{2n} = L_2 - L_m^2 / L_1$ -переходная индуктивность при питании двигателя, соответственно, со стороны статора и ротора (рис. 2).

Подставляя (7) и (8) в (1) и (2), получим:

$$\bar{U}_1 = \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} + \left(\frac{R_1}{L_{1n}} + J\omega_k \right) \bar{\psi}_1 - K_2 \frac{R_1}{L_{1n}} \bar{\psi}_2 ; \quad (9)$$

$$0 = \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} - K_1 \frac{R_2}{L_{2n}} \bar{\psi}_1 + \left[\frac{R_2}{L_{2n}} + J(\omega_k - z_n \omega) \right] \bar{\psi}_2 . \quad (10)$$

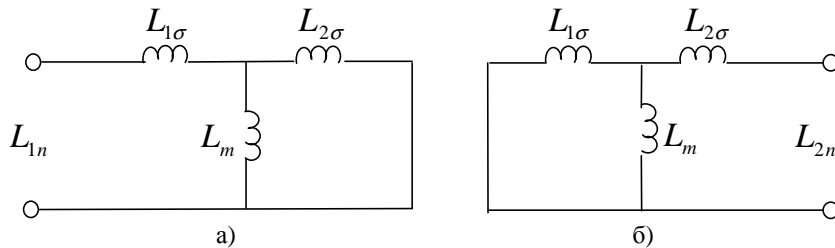


Рис. 2.Схемы замещения к определению переходной индуктивности статора (а) и ротора (б)

В таком виде уравнения более удобны для исследования переходных процессов, чем выражения, содержащие токи и потокосцепления. Причем, если при исследовании переходных процессов анализируются только моменты двигателя и характер движения, то можно вообще избежать определения токов, т.к. вращающий момент может быть определен непосредственно по потокосцеплениям:

$$M = \frac{3}{2} z_n \frac{L_m}{L_2 L_{1n}} \bar{\psi}_2 \bar{\psi}_1 = \frac{3}{2} z_n \frac{L_m}{L_1 L_{2n}} \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2 . \quad (11)$$

Поскольку угловая скорость двигателя и ее изменения оказывают обратное воздействие на токи и потокосцепления, то электромагнитные и механические переходные процессы следует рассматривать совместно. Для чего дополнительно используют уравнение движения

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} . \quad (12)$$

Как известно, в момент включения асинхронного двигателя, помимо установившихся токов (принужденная составляющая) возникает и свободная составляющая токов, которая обеспечивает условие равенства нулю токов в момент включения.

Частное решение неоднородной системы дифференциальных уравнений (1) и (2) дает токи в установившемся режиме (принужденная составляющая). Общее решение получается после прибавления к токам установившегося режима свободных токов, найденных в результате решения соответствующей однородной системы уравнений, полученной при приравнении к нулю напряжения статора.

Характер и длительность протекания свободных составляющих токов удобно проанализировать, рассмотрев включение неподвижного двигателя на постоянное напряжение. Для упрощения анализа предположим равенство сопротивлений и индуктивностей статора и ротора: $R_1 = R_2 = R$; $L_{1\sigma} = L_{2\sigma} = L_\sigma$.

При этом для схемы замещения на рис.1 при учете только активных и индуктивных сопротивлений результирующее операторное входное сопротивление со стороны первичной обмотки

$$Z(p) = R + pL_\sigma + \frac{(R + pL_\sigma)pL_m}{R + p(L_\sigma + L_m)}. \quad (13)$$

После соответствующих преобразований выражение (13) можно записать так:

$$Z(p) = \frac{(R + pL_\sigma) \cdot [R + p(L_\sigma + 2L_m)]}{R + p(L_\sigma + L_m)}. \quad (14)$$

Тогда ток в обмотке статора при включении на постоянное напряжение

$$i_1(p) = U(p) \frac{R + p(L_\sigma + L_m)}{(R + pL_\sigma)[R + p(L_\sigma + 2L_m)]}. \quad (15)$$

Корни знаменателя $p_1 = -R/L_\sigma$; $p_2 = -R/(L_\sigma + 2L_m)$. С учетом этого применяя теорему разложения, получим после преобразования

$$i_1 = \frac{U}{R} \left(1 - \frac{1}{2} e^{-t/T_1} - \frac{1}{2} e^{-t/T_2} \right) = \frac{U}{R} [(0,5 - e^{-t/T_1}) + (0,5 - e^{-t/T_2})] = i'_1 + i''_1, \quad (16)$$

где $T_1 = L_{1\sigma}/R$ - постоянная времени, обусловленная индуктивностью рассеяния; $T_2 = \frac{(L_\sigma + 2L_m)}{R}$ - постоянная времени, обусловленная основным магнитным потоком, которая значительно больше T_1 .

Согласно (16) на рис. 3 приведены кривые переходного процесса при включении двигателя на постоянное напряжение. Из приведенного рисунка видно, что первая составляющая переходного тока статора i'_1 возрастает по экспоненте до установившегося значения $U/2R$ с постоянной времени $T_1 = L_{1\sigma}/R$. Вторая составляющая i''_1 увеличивается по экспоненте до величины $U/2R$, но с постоянной времени $T_2 \gg T_1$.

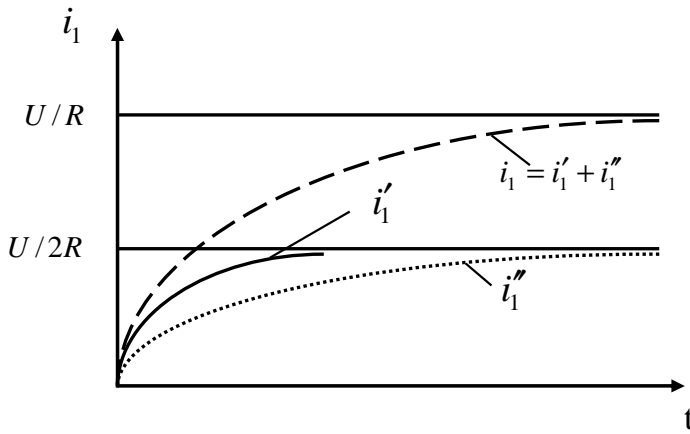


Рис. 3. Кривые тока статора при включении двигателя на постоянное напряжение

Согласно схеме замещения следует, что

$$i_2 = i_1 \frac{pL_m}{R + p(L_\sigma + L_m)}. \quad (17)$$

Решая (17) совместно с (15)

получим, используя теорему разложения

$$i_2 = \frac{U}{R} \left(\frac{1}{2} e^{-t/T_2} - \frac{1}{2} e^{-t/T_1} \right). \quad (18)$$

Из этого уравнения следует, что ток ротора является суммой двух свободных составляющих. Первая из них в момент $t=0$ равна $-U/2R$ и с малой постоянной времени T_1 быстро убывает до нуля. Вторая составляющая в момент включения имеет величину $U/2R$ и с большой постоянной времени $T_2 \gg T_1$ также уменьшается до нуля.

Так как для определения свободных составляющих токов необходимо положить равным нулю напряжение статора и ротора, то схема замещения для свободных токов должна быть симметрична относительно намагничивающего контура и обе ее стороны короткозамкнутые. Распределение свободных составляющих также должно быть симметричным:

- свободные составляющие токов статора и ротора, намагничивающие машину в одном и том же направлении и создающие основной магнитный поток и поток рассеяния обмоток статора и ротора. Эти токи затухают с большой постоянной времени $T_2 = (L_\sigma + 2L_m)/R$;

- свободные составляющие токов, затухающие с малой постоянной времени, намагничивающие машину в противоположных направлениях (протекает по намагничивающему контуру в разных направлениях и поэтому создают лишь потоки рассеяния). Так как в намагничивающем контуре отсутствует ток, то его можно исключить из схемы замещения асинхронного двигателя. При этом постоянная времени затухания T_1 определяется в общем случае как

$$T_1 = (L_{1\sigma} + L'_{2\sigma}) / (R_1 + R'_2)$$

При принятых допущениях равенства индуктивностей рассеяния и активных сопротивлений обмоток статора и ротора $T_1 = L_\sigma / R$. Таким образом, при включении двигателя токи, протекающие в обмотках статора и ротора, являются суммой соответствующих установившихся и свободных токов и для результирующих векторов имеют вид:

$$\begin{aligned}\bar{i}_1 &= \bar{I}_1 e^{J\omega_1 t} + \bar{C}_1 e^{-t/T_1} + \bar{C}_2 e^{-t/T_2} \\ \bar{i}_2 &= \bar{I}_2 e^{J\omega_1 t} + \bar{C}_1 e^{-t/T_1} - \bar{C}_2 e^{-t/T_2}.\end{aligned}\quad (19)$$

Величины свободных токов можно определить исходя из начальных условий, согласно которых в момент включения $t=0$ токи статора и ротора должны быть равны нулю. Следовательно, согласно (19) имеем:

$$0 = \bar{I}_1 + \bar{C}_1 + \bar{C}_2; \quad 0 = \bar{I}_2 + \bar{C}_1 - \bar{C}_2 \quad (20)$$

Откуда с учетом тока намагничивания $\bar{I}_m = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$ находим:

$$C_1 = (\bar{I}_2 - \bar{I}_1) / 2; \quad C_2 = -\bar{I}_m / 2. \quad (21)$$

Вращающийся момент двигателя может быть определен по формуле:

$$M = \frac{3}{2} z_n L_m \bar{I}_2 \times \bar{I}_1.$$

Подставляя в это выражение токи из (19), получим

$$M = \frac{3}{2} z_n L_m (\bar{I}_1 e^{J\omega_1 t} + \bar{C}_1 e^{-t/T_1} + \bar{C}_2 e^{-t/T_2}) \times (\bar{I}_2 + \bar{C}_1 e^{-t/T_1} - \bar{C}_2 e^{-t/T_2}). \quad (22)$$

При почленном перемножении векторное произведение переменных, совпадающих по направлению, равно нулю. Остается всего четыре произведения, создающие момент двигателя в переходных режимах [1]

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4. \quad (23)$$

Момент M_1 создается произведением установившихся токов короткого замыкания $M_1 = M_{к.з} = \frac{3}{2} z_n L_m \bar{I}_1 \times \bar{I}_2$. Множитель $e^{J\omega_1 t}$ при этих составляющих опущен, так как в результате этого угол, заключенный между этими векторами, не меняется.

Момент M_2 представляет произведение апериодических составляющих

$$M_2 = \frac{3}{2} z_n L_m (\bar{C}_2 e^{-t/T_2} - \bar{C}_1 e^{-t/T_1}) \times (\bar{C}_2 e^{-t/T_2} + \bar{C}_1 e^{-t/T_1}).$$

Из приведенного выражения следует, что при $t = 0$

$$M_2(0) = \frac{3}{2} z_n L_m (\bar{C}_2 - \bar{C}_1) \times (\bar{C}_2 + \bar{C}_1).$$

С учетом (21) имеем

$$M_2(0) = \frac{3}{2} z_n L_m \bar{I}_2 \times \bar{I}_1,$$

величина которого в первый момент времени совпадает с $M_1(M_{к.з.})$ и поэтому можно записать

$$M_1 = M_{к.з.} e^{-t\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)} \approx M_{к.з.} e^{-t/T_1}$$

т.е. затухает с той же скоростью, что и поток рассеяния. Для машин малой и средней мощности по истечению нескольких периодов этой составляющей можно пренебречь.

Составляющая M_3 определяется произведением установившихся принужденных токов, затухающих с большой постоянной времени. Поэтому эта составляющая момента колеблется с частотой сети, а ее амплитуда затухает с большой постоянной времени T_2 .

Произведение установившихся токов и апериодических, затухающих с малой постоянной времени, образуют составляющую момента M_4 , который также колеблется с частотой сети, а амплитуда уменьшается в соответствии с малой постоянной времени

$$T_1 = L_1\sigma / R_1 + L_2\sigma / R_2.$$

Сумма четырех составляющих вращающего момента соответствует моменту, который развивал бы асинхронный двигатель при неподвижном роторе. Момент двигателя при пуске кратковременно может достигать больших значений. По истечению нескольких периодов, когда составляющие M_4 и M_2 затухают, момент двигателя колеблется около среднего значения $M_{к.з.}$, пульсирующая составляющая его затухает с постоянной времени T_2 .

Аналитический расчет электромеханических переходных процессов в нелинейной системе, которой является асинхронный двигатель, представляет большие трудности, поэтому анализ динамических режимов в асинхронном электроприводе ведётся обычно с помощью ЭВМ на базе (1)...(4). Однако приведенные выражения позволяют оценить влияние свободных составляющих токов на момент, развиваемый двигателем на начальном этапе пуска, когда скорость двигателя еще не успела существенно измениться и можно принять $\omega = 0$.

Электромагнитная инерция асинхронного двигателя ограничивает темп нарастания момента двигателя, исключая возможность его нарастания скачком. Вместе с тем наличие свободных составляющих токов переходного процесса вызывают большие и многократно повторяющиеся пики момента, превышающие статический пусковой момент в несколько раз.

Существенное снижение пусковых пиков момента асинхронного двигателя может быть достигнуто ограничением темпа нарастания напряжения, приложенного к двигателю, что достигается применением тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением. Однако наиболее благоприятный характер переходных процессов может быть достигнут в частично-регулируемом асинхронном электроприводе.

Список литературы

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М – Л: Госэнергоиздат 1963 - 744с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1998 – 704с.