

Ротанов Владимир Николаевич

канд. техн. наук, доцент

Алексеев Алексей Сергеевич

канд. техн. наук, доцент

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»

г. Москва

КРИТИЧЕСКОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПУСКЕ

***Аннотация:** в статье анализируется критическое скольжение асинхронного двигателя во время пуска при моменте, существенно превышающем номинальное значение, что соответствует реальным режимам пуска тягового подвижного состава.*

***Ключевые слова:** асинхронный тяговый привод, тяговый электродвигатель, режим пуска, критическое скольжение, критический момент.*

Важное место в частотном регулировании асинхронных двигателей (АД) имеет место то обстоятельство, что в начальной стадии пуска в зоне низких частот и при неизменном напряжении статора АД может происходить существенное уменьшение критического абсолютного скольжения $f_{2к}$, соответствующего максимуму момента. В результате начальная частота тока статора может быть больше $f_{2к}$ и пуск АД происходит по неустойчивой части механической характеристики, что отрицательно сказывается на тяговых свойствах двигателя.

Вывод о снижении $f_{2к}$ справедлив для случая ненасыщенной машины, т.е. для режимов, когда магнитный поток не превосходит номинальной величины M_n . Для тягового АД характерны режимы пуска при моментах, превышающих номинальный M_n . Кроме того, для уменьшения потерь мощности в двигателе, вентилях преобразователя частоты и для снижения расхода электроэнергии необходимо осуществлять пуск АД в режиме минимума тока статора. Такой режим пуска связан с увеличением магнитного потока сверх Φ_n . Нетрудно

показать, что при $\Phi > \Phi_n$ и постоянном напряжении статора U_1 критическое абсолютное скольжение практически не снижается в полном диапазоне регулирования частоты f_1 тока статора и остается таким же, как в случае регулирования АД при постоянстве магнитного потока.

Выполним анализ по первым гармоническим составляющим напряжения и тока, пренебрегая потерями в стали. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя, основные режимы его работы и характерные точки приведены на рис. 1, а векторная диаграмма АД – на рис. 2.

Введем следующие обозначения: r_1, x_1 – активное и индуктивное (от потоков рассеяния) сопротивления обмотки статора; r_2', x_2' – приведенные к статору активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора; x_\square – индуктивное сопротивление цепи намагничивания; E – э.д.с. цепи намагничивания; I_1 – ток статора; I_2' – приведенный ток ротора; I_\square – ток намагничивания; f_2 – частота тока ротора (абсолютное скольжение); f_{1n} – номинальная частота тока статора; $f_1^* = f_1 / f_{1n}$, $f_2^* = f_2 / f_{2n}$ – относительные частоты токов статора и ротора соответственно. Индуктивные сопротивления x_1, x_2', x_\square указаны для частоты f_{1n} .

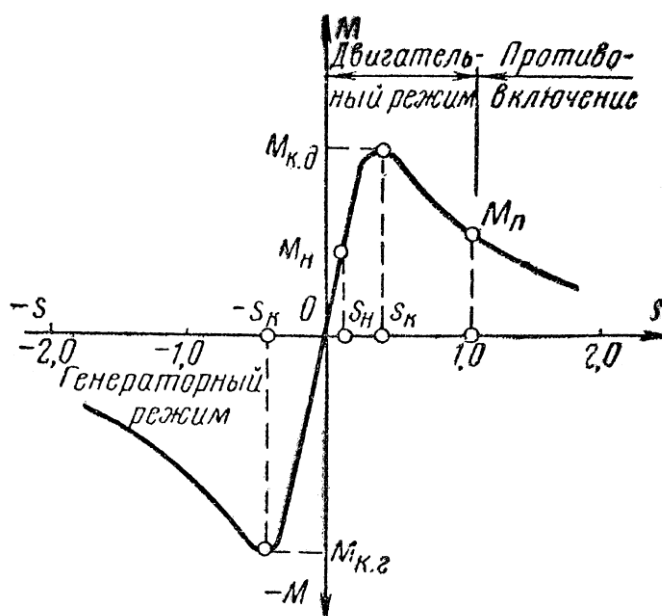


Рис. 1. Механическая характеристика АД

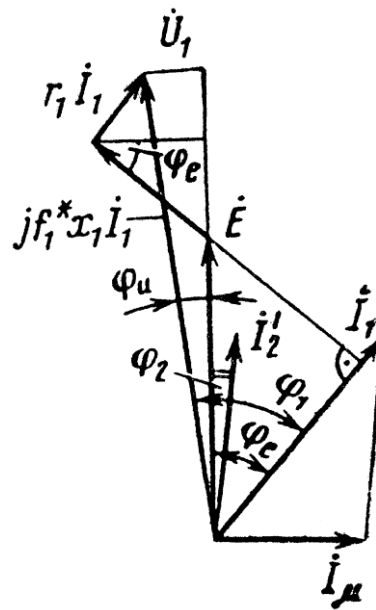


Рис. 2. Векторная диаграмма АД

Магнитный поток определяется соотношением

$$\Phi = \frac{E}{c \cdot f_1^* \cdot f_{1н}},$$

где c – электромагнитная постоянная машины.

Режим постоянства потока выполняется, если в процессе регулирования частоты э.д.с. изменяется в соотношении $E = E_0 \cdot f_1^*$, где E_0 – фиксированное значение э.д.с., определяемое по характеристике намагничивания $E(I_\square)$ при $f_1^* = 1$. В этом случае из схемы замещения АД получим выражения для тока ротора I_2' и угла φ_2 между векторами \dot{E} и I_2' :

$$I_2' = \frac{E_0}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{f_2^*}\right)^2 + (x_2')^2}}; \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{f_2^* x_2'}{r_2'}. \quad (2)$$

При числе пар полюсов p частота вращения ротора (об / мин) равна

$$n = \frac{60 f_{1н} (f_1^* - f_2^*)}{p},$$

а электромагнитный момент двигателя (Н · м)

$$M = \frac{9,56P_2}{n},$$

где мощность трехфазной машины в цепи ротора

$$P_2 = 3f_1^* E_0 I_2' \cos \varphi_2.$$

Приняв для номинального режима $f_1^* = 1, f_2^* \approx 0$, получим

$$M = \frac{0,478pE_0 I_2' \cos \varphi_2}{f_{1н}}.$$

Как следует из (1) и (2), в режиме $\Phi = \text{const}$ во всей зоне пуска ток I_2' и угол φ_2 не зависят от текущего значения частоты f_1 . Поэтому не зависит от f_1 и вращающий момент АД. С учетом приведенных соотношений получаем следующее выражение для момента:

$$M = \frac{0,478pE_0 \cos \left(\arctg \frac{f_2^* x_2'}{r_2'} \right)}{f_{1н} \sqrt{\left(\frac{r_2'}{f_2^*} \right)^2 + (x_2')^2}}. \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что при фиксированном значении E_0 момент АД однозначно определяется абсолютным скольжением f_2 . Максимального (критического) значения M_k момент достигает при критическом скольжении, определяемом известным соотношением

$$f_{2к}^* = \frac{r_2'}{x_2'},$$

$$\text{а } M_k = \frac{0,24pE_0}{f_{1н} x_2'}.$$

При значении потока $\Phi > \Phi_n$ магнитная цепь машины имеет высокую степень насыщения, э.д.с. E и, соответственно, поток не могут заметно возрасти, т.к. небольшое увеличение э.д.с. E вызывает резкое возрастание тока намагничивания I_μ и потому ток статора I_1 уменьшается незначительно при снижении скольжения f_2 ($I_1 = \text{const}$). В результате характеристика $M(f_2)$ при $U_1 = \text{const}$ мало отличается от аналогичной характеристики при $\Phi = \text{const}$. Таким образом, в характерных для тягового АД режимах пуска (с $\Phi > \Phi_n$) снижения критического

скольжения в зоне низких частот не происходит. Как и в режиме постоянства магнитного потока, критическое скольжение практически не зависит от параметров обмотки статора и определяется выражением

$$f_{2к}^* = \frac{r_2'}{x_2'}.$$

Список литературы

1. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов / И.П. Копылов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для вузов. Часть 2: машины переменного тока / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.
3. Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.