

## Методика расчета параметров и характеристик асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

### *Определение дополнительных параметров двигателя по справочным техническим данным*

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_{1н}}{z_p} = \frac{\pi \cdot n_0}{30}, \text{ рад/с.}$$

Номинальная частота и угловая скорость вращения двигателя:

$$n_{дв.н} = (1 - s_n) \cdot n_0, \text{ об/мин,} \quad \omega_{дв.н} = (1 - s_n) \cdot \omega_0, \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{дв.н} = \frac{P_{дв.н} \cdot 10^3}{\omega_{дв.н}}, \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный и линейный ток (действующие значения) статора при схеме соединения обмоток **звезда**:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}, \text{ В;} \quad I_{1фн} = I_{1лн} = I_{двн} = \frac{P_{двн}}{3 \cdot U_{1фн} \cdot \cos\varphi_n \cdot \eta_n}, \text{ А.}$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{1\text{макс}} = k_{i\text{дв}} \cdot I_{1лн}, \text{ А.}$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_k = m_k \cdot M_{дв.н}, \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске

$$M_{дв.пуск} = m_{п} \cdot M_{дв.н}, \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

### *Определение параметров схемы замещения в абсолютных единицах по параметрам схемы замещения в относительных единицах*

Если в справочной литературе для выбранного асинхронного двигателя (например, серии 4А) параметры схемы замещения приведены в относительных единицах, то значения параметров в абсолютных единицах для Т-образной схемы замещения рассчитываются по приведенным ниже выражениям.

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = R_1' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}}, \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1\sigma} = X_1' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}}, \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}}, \text{ Гн.}$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора

$$R_2' = R_2'' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}}, \text{ Ом.}$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X_{2\sigma}' = X_2'' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}}, \text{ Ом.}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния,

$$L_{2\sigma}' = \frac{X_{2\sigma}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}}, \text{ Гн.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания при номинальном режиме

$$X_{\text{кн}} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}', \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление)

$$X_{\mu} = X_{\mu}' \cdot \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}}, \text{ Ом.}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания)

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}}, \text{ Гн.}$$

Ток холостого хода двигателя

$$I_0 = \frac{E_1}{X_\mu}, \text{ А,}$$

где

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{фн}} \cdot R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{фн}} \cdot X_{1\sigma})^2}$$

– ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора (главным полем) в номинальном режиме, В.

### *Проверка адекватности расчетных параметров двигателя*

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя:

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L_{2\sigma}')}. \Psi_{2\text{н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{н}}^2 - I_0^2}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

где

$$\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m, \text{ Вб.}$$

Должны выполняться условия:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}}^* \leq 1.1 \cdot M_{\text{дв.н}}; \quad M_{\text{эм.н}}^{**} \approx M_{\text{эм.н}}^*.$$

Если не выполняется первое условие, то следует изменить значение  $R_2'$ , если второе – то следует изменить значение параметра  $X_\mu'$ .

### *Расчет естественной механической характеристики*

Естественная механическая характеристика  $M_{\text{эм}}(s)$  электродвигателя для частоты  $f_{1\text{н}} = 50$  Гц рассчитывается по выражению

$$M_{\text{эм}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

где  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

По результатам расчета строится механическая характеристика  $\omega(M_{\text{эм}})$  (рис. 5, а), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Параметры характерных точек на естественной механической характеристике двигателя:

– значение электромагнитного номинального момента при номинальном скольжении  $s_{\text{н}}$

$$M_{\text{эм}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}, \text{Н} \cdot \text{м};$$

– значение критического скольжения

$$s_{\text{к}} = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left( \frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2}{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}};$$

– значение электромагнитного критического момента при критическом скольжении

$$M_{\text{эм}}(s_{\text{к}}) = M_{\text{эм.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{\left( R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \right) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2 \right]} \right\}}, \text{Н} \cdot \text{м}.$$

### ***Расчет естественных электромеханических характеристик***

Естественные электромеханические характеристики  $I_1(s)$  и  $I_2(s)$  электродвигателя рассчитывается для частоты  $f_{1\text{н}} = 50$  Гц по выражению

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

где  $I_1 = I_{1\phi}$  – действующее значение фазного тока двигателя, А;

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}}\right)^2}},$$

– приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{\mu})^2}},$$

– действующее значение тока холостого хода, А;

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{кн})^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}}\right)^2}}.$$

По результатам расчета строятся электромеханические характеристики  $\omega(I_1)$  и  $\omega(I_2')$  (рис. 5, б), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для скольжения  $s = s_H$  рассчитывается значения номинального тока статора  $I_{1H}(s_H)$ . Сравнив значения расчетных параметров характерных точек естественных характеристик двигателя с его справочными данными, следует сделать вывод об адекватности расчетных параметров схемы замещения двигателя.

## НАГРУЗКИ

$\Sigma M_c = M_{смех} + \Delta M_{с. дв}$  – общая суммарная нагрузка;

$M_{смех}$  – расчетное значение нагрузки механизма;

$\Delta M_{с. дв} = M_{эм.н}^* - M_{дв.н}$  – момент от сил трения собственно двигателя, Н · м ;

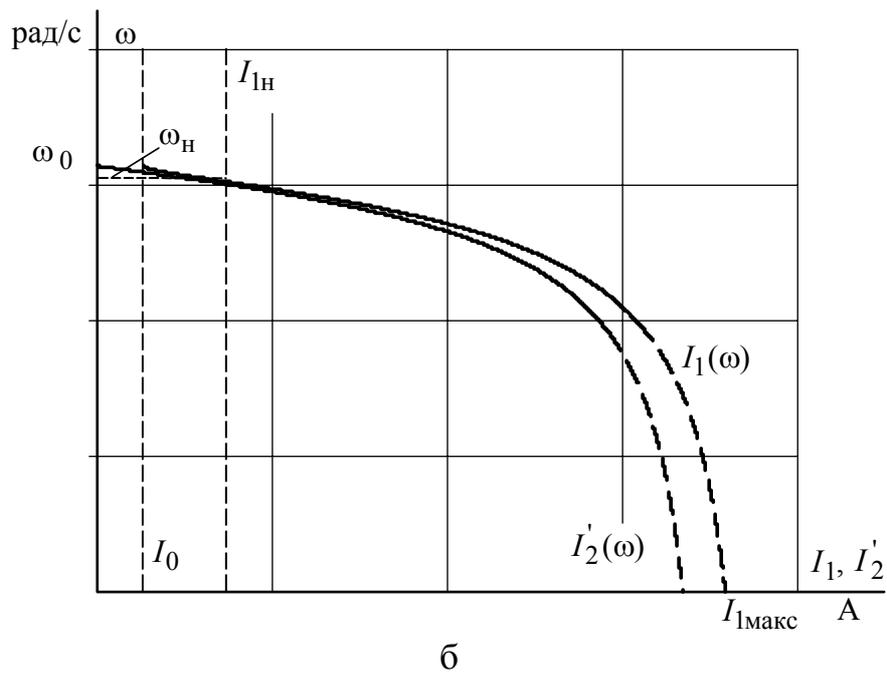
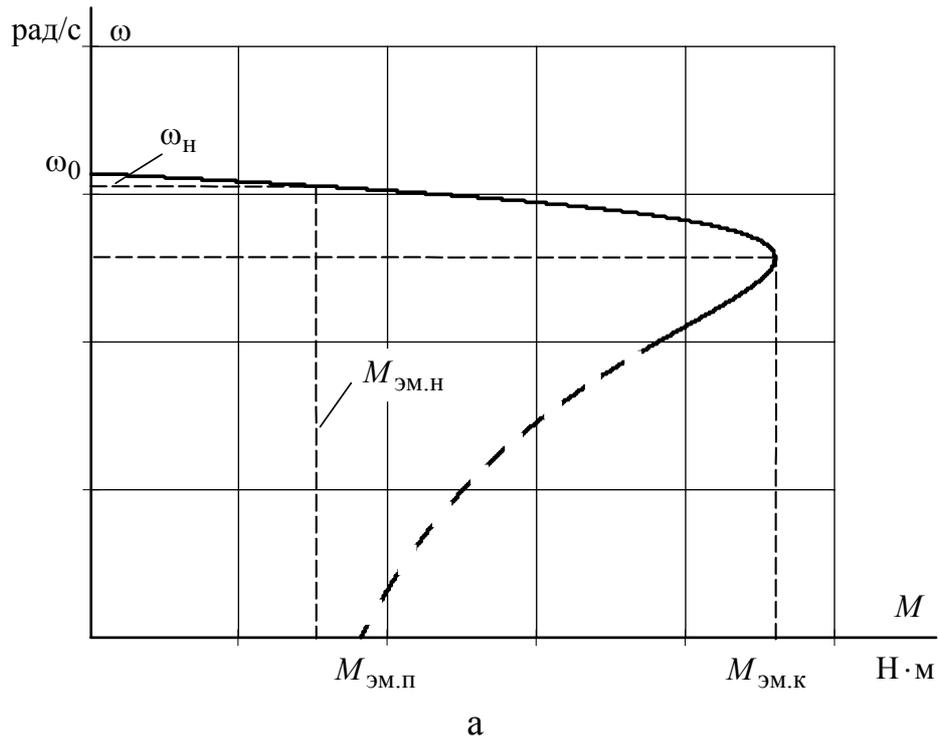


Рис. 5. Естественные характеристики асинхронного двигателя: а – механическая  $\omega(M_{эм})$ ; б – электромеханические  $\omega(I_1)$  и  $\omega(I'_2)$

### **Расчет искусственных механических характеристик**

Следует рассчитать и построить семейство механических характеристик электродвигателя в диапазоне частот от  $f_{1\text{мин}}$  до  $f_{1\text{макс}}$ . Минимальное значение частоты следует принять 3–5 Гц, а максимальная частота определяется исходя из заданного значения максимальной скорости электропривода

$$f_{1\text{макс}} = f_{1\text{н}} \cdot \frac{\omega_{\text{эп.макс}}}{\omega_{\text{н}}}, \text{ Гц.}$$

Искусственная механическая характеристика  $M_{\text{эм}}(s)$  электродвигателя для частоты  $f_1$  рассчитывается по выражению

$$M_{\text{эм}}(s) = \frac{3 \cdot (U_{1\text{фн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}})^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot s \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}} \right)^2 \right]}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По результатам расчета строится механическая характеристика  $\omega(M_{\text{эм}})$  для частоты  $f_1$ , где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot (1-s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

### **Расчет искусственных электромеханических характеристик**

Искусственные электромеханические характеристики  $I_1(s)$  и  $I_2'(s)$  электродвигателя для частоты  $f_1$  рассчитываются по выражениям:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\text{фн}} \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)}{\pm \sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}} \right)^2}},$$

– приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\phi H} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}},$$

– действующее значение тока холостого хода, А;

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{кн} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{кн})^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_{1H}}{f_1}\right)^2}}.$$

По результатам расчета строятся электромеханические характеристики  $\omega(I_1)$  для частоты  $f_1$ , где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right) \cdot (1-s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Используя закон  $\frac{U_{1\phi}}{f} = \text{const}$  обеспечить отработку заданных скоростей при рассчитанной нагрузке.

На искусственных характеристиках должно выполняться условие

$$M_{\text{эм.к}} \geq 1.5 \cdot M_{\text{эм.н}}.$$

Если это условие не выполняется, необходимо скорректировать значение  $U_{1\phi}$  (провести  $IR$ - компенсацию), обеспечив при этом заданную скорость.