

**РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПО СХЕМЕ АСИНХРОННО-ТИРИСТОРНОГО КАСКАДА (АТК)**

**1. Введение.** Электроприводы АТК (АВК), выпускаемые корпорацией «ХЭЗ-Элетекс-С», успешно эксплуатируются на предприятиях горнодобывающей промышленности (шахты, ГОКи), обеспечивая экономию электроэнергии, улучшение технологического процесса и увеличение межремонтного периода эксплуатации оборудования.

В современных экономических условиях внедрению оборудования должен предшествовать расчет экономической эффективности и срока окупаемости затрат на приобретение оборудования и его внедрение. В статье приводятся соотношения, достаточные для расчета энергетических характеристик рассматриваемого типа электропривода в сопоставлении с традиционными методами управления режимами работы механизмов.

**2. Схема АТК (рис.1).**

Базовыми исходными данными для расчета процессов являются приведенные в таблице 1 паспортные данные асинхронного двигателя с фазным ротором.

**3. Параметры двигателя.**

Ниже переменные режима работы двигателя выражаются в относительных единицах (о.е.). Базовые значения следующие:

$$U_{\delta_1} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3}}, \quad I_{\delta_1} = I_{1н},$$

$$Z_{\delta_1} = \frac{U_{\delta_1}}{I_{\delta_1}}, \quad \omega_{\delta} = 2\pi f_n,$$

$$P_{\delta(\kappa Bm)_1} = 3U_{\delta}I_{\delta}(U_{\delta} \text{ в кВ})$$

Параметры двигателя (индуктивные и активные сопротивления) также выражаются в о.е. В расчетах используются переменные и параметры ротора, приведенного к статору. Формулы для расчета параметров двигателя по каталожным данным приведены в таблице 2.

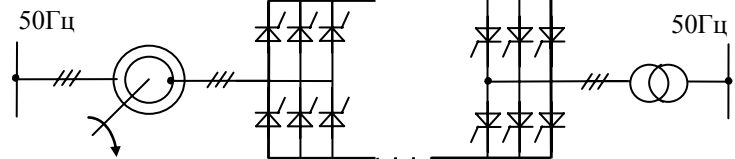


Рисунок 1

Таблица 1

№	Обозначение	Размерность	Пояснение
1	$P_n$	кВт	Номинальная мощность на валу
2	$U_{1н}$	В (кВ)	Номинальное напряжение статора
3	$I_{1н}$	а	Номинальный ток статора
4	$\cos\varphi_n$		Номинальный $\cos\varphi$ статора
5	$\eta_n$		Номинальный к.п.д. двигателя, в диапазоне $1,2 > (P/P_n) > 0,2$ , к.п.д. близок (принимается равным) $\eta_n$
6	$U_{2н}$	В (кВ)	Табличное значение напряжения ротора
7	$I_{2н}$	а	Номинальный ток ротора
8	$m_{max}$		Отношение максимального момента двигателя к номинальному
9	$n_n(S_n)$	об/мин	Номинальная скорость (скольжение) двигателя

Таблица 2

№	Обозначение	Формула	Пояснение
1	$X_1'$	$X_1' = A - \sqrt{A^2 - \frac{1}{1 + m_{max} \sin 2\varphi_n}}$ $A = \frac{m_{max} \cos \varphi_n + \sin \varphi_n}{1 + m_{max} \sin 2\varphi_n}$	$X_1'$ – индуктивное сопротивление идеального короткого замыкания ( $S=\infty$ ) $S$ – скольжение
2	$X_1$	$X_1 = \frac{1 - \sin \varphi_n X_1'}{\sin \varphi_n - X_1'}$	Индуктивное сопротивление идеального холостого хода ( $S=0$ )
3	$X_0$	$X_0 = \sqrt{X_1(X_1 - X_1')}$	Индуктивное сопротивление взаимной индукции статора и ротора
4	$U_2(o.e.)$	$U_2 = X_0 / X_1$	Табличное напряжение ротора, приведенного к статору, в о.е.
5	$I_{2н(o.e.)}$	$I_{2н} = \frac{X_1}{X_0} \sqrt{\cos^2 \varphi_n + \left( \sin \varphi_n - \frac{1}{X_1} \right)^2}$	Номинальный ток ротора, приведенного к статору, в о.е.
6	$\varphi_{2н}$	$\varphi_{2н} = \arctg \frac{\sin \varphi_n - \frac{1}{X_1}}{\cos \varphi_n}$	$\varphi_2$ - угол сдвига вектора приведенного тока ротора относительно вектора $-\bar{U}_1$

Расчетные соотношения получены для идеализированного двигателя, параметры которого не зависят от режима работы, и потери в котором равны нулю. К.п.д. двигателя будет учитываться в итоговых энергетических соотношениях.

#### 4. Расчет активной и реактивной мощности асинхронного двигателя.

Традиционным способом регулирования скорости двигателя с фазным ротором является включение активного сопротивления в роторную цепь двигателя. Формулы для расчета активной и реактивной мощностей двигателя приведены в таблице 3. Исходным параметром является момент на валу двигателя  $M$  (кГм).

Таблица 3

№	Обозначение	Формула	Пояснение
1	$m$	$M = M / M_n$	Отношение момента на валу к номинальному моменту двигателя
2	$\sin 2\varphi_2$	$\sin 2\varphi_2 = \frac{m}{m_{\max}}$	Угол $\varphi_2$ см. таблицу 2
3	$I_{1a.o.e.}$	$I_{1a} = \frac{X_1 - X_1'}{2X_1X_1'} \frac{m}{m_{\max}}$	Активный ток статора без учета $\eta_{\text{двиг.}}$
4	$I_{1p.o.e.}$	$I_{1p} = \frac{1}{X_1} + \frac{X_1 - X_1'}{2X_1X_1'} (1 - \cos 2\varphi_2)$	Реактивный ток статора
5	$P_a(\text{кВт})$	$P_a = P_\delta \frac{I_{1a}(o.e.)}{\eta_{\text{дв.}}}$	Активная мощность, потребляемая из сети, $\eta_{\text{двиг.}}$ учитывает потери в двигателе
6	$Q(\text{кВа})$	$Q = P_\delta \cdot I_{1p}(o.e.)$	Реактивная мощность, потребляемая из сети

#### 5. Формулы для расчета энергетических характеристик электропривода АТК.

Для расчета процессов в роторной цепи принимается, что статор и ротор двигателя симметричны.

$$X_{2o.e.} = X_{1o.e.}, X'_{2o.e.} = X'_{1o.e.}$$

Расчетная схема замещения цепи ротора, приведенного к статору, показана на рис.2. К.п.д. двигателя  $\eta_{\text{двиг.}}$  в выражении  $\bar{U}$  эмпирически учитывает влияние потерь в двигателе на электромагнитные процессы в роторе.

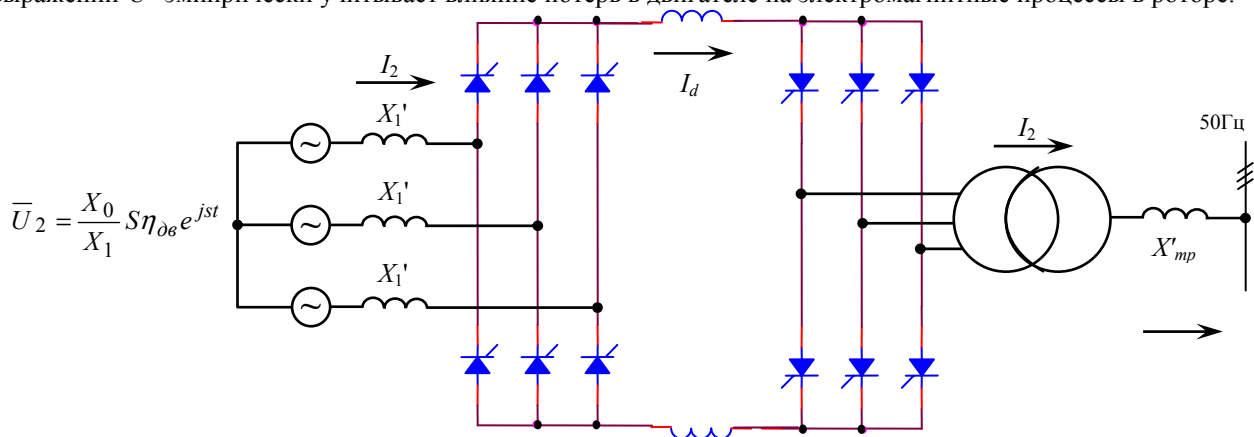


Рисунок 2

На схеме различаем роторный и сетевой преобразователи. Напряжение высоковольтной обмотки сетевого согласующего трансформатора равно  $U_{1mp} = 1o.e.$ , низковольтной с учетом приведения ротора двигателя к статору равно

$$U_{2mp} = (X_0 / X_1) \cdot K_T o.e.$$

где  $K_T$  соотношение между напряжениями вторичной обмотки трансформатора и табличным значением напряжения ротора.

Расчет процессов выполняется для заданного момента на валу двигателя  $m_{o.e.}$  (таблица 3).

В таблице 4 приведены расчетные соотношения для токов каскада (все величины в относительных единицах). Итоговые данные, характеризующие энергетику АТК, приведены в таблице 5.

Сопоставление результатов цифрового моделирования электропривода АТК с результатами предлагаемого аналитического метода показало высшую точность аналитического метода.

Расчеты и результаты промышленного внедрения электроприводов АТК дают следующие результаты:

- энергопотребление при использовании АТК в электроприводе шахтных подъемных машин снижается в среднем на 30%, а для вентиляторов главного проветривания шахт от 25% до 55%,

- электроприводы АТК поставки Корпорации «ХЭЗ-Элетекс-С» наряду с экономией электроэнергии обеспечивают полную автоматизацию технологического процесса, компьютерную визуализацию работы всего комплекса оборудования, диагностику неисправностей и архивирование данных.

Таблица 4

№	Обозначение	Формула	Пояснение
1	$I_{2a_{o.e.}}$	$I_{2a} = I_{2н} \cos \varphi_{2н} \cdot m$	Активный ток ротора, приведенного к статору, $\cos \varphi_{2н}$ – см. табл.2
2	$I_{2_{o.e.}}$	$I_2 = \frac{3 \cos \alpha_p}{\pi X'_1} - \sqrt{\left(\frac{3 \cos \alpha_p}{\pi X'_1}\right)^2 - \frac{6}{\pi X'_1} I_{2a}}$	Полный ток ротора, $\alpha_p$ – угол запаздывания роторного преобразователя: двигательный режим $\left(0 \div \frac{\pi}{2}\right)$ , тормозной $\left(\frac{\pi}{2} \div \alpha_{\max}\right)$
3	$\cos \varphi_2$	$\cos \varphi_2 = I_{2a} / I_2$	Коэффициент сдвига роторной цепи
4	$I_{d_{o.e.}}$	$I_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_2$	Величина постоянного тока
5	$\gamma_2$	$\gamma_2 = 2 I_d X'_1 / \sqrt{6} \frac{X_0}{X_1} \sin \varphi_2$	$\gamma_2$ – расчетный угол прямолинейной коммутации роторного преобразователя
6	$I_{2k_{o.e.}}$ $k \neq 1$	$I_{2k} = I_2 \left  \frac{1}{K} \frac{\sin \frac{K \gamma_2}{2}}{\frac{K \gamma_2}{2}} \right , K = 6n + 1, n = -\infty \div \infty$	Величина высших гармоник порядка K, частота высших гармоник тока ротора равна $K_2 = K \cdot S$
7	$\cos \varphi_2$	$\cos \varphi_c = -S \eta_{\delta\delta} \cos \varphi_2 \frac{1}{K_T}$	Коэффициент сдвига сетевого преобразователя
8	$\gamma_c$	$\gamma_c = \frac{2 I_d X'_{Tp}}{\sqrt{6} \sin \varphi_c} \cdot \frac{X_1}{X_0 K_T}$	$\gamma_c$ – расчетный угол прямолинейной коммутации сетевого преобразователя, $X'_{mp}$ – сопротивление к.з. трансформатора
9	$I_{Tk_{o.e.}}$ $k \neq 1$	$I_{Tk} = I_2 \left  \frac{1}{K} \frac{\sin \frac{K \gamma_c}{2}}{\frac{K \gamma_c}{2}} \right  \frac{X_0 K_T}{X_1}, K = 6n + 1, n = -\infty \div \infty$	Величина высших гармоник тока сетевого преобразователя порядка K, частота высших гармоник $K_c = K$
10	$I_{Ta_{o.e.}}$	$I_{Ta} = I_{2a} \frac{X_0}{X_1} K_T$	Активный ток трансформатора
11	$I_{Tp_{o.e.}}$	$I_{Tp} = I_2 \cdot \sin \varphi_{c2} \frac{X_0}{X_1} K_T$	Реактивный ток трансформатора
12	$I_{1a_{o.e.}}$	$I_{1a} = I_{2a} \frac{X_0}{X_1} \frac{1}{\eta_{\delta\delta}}$	Активный ток статора двигателя
13	$I_{1p_{o.e.}}$	$I_{1p} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 \frac{X_0}{X_1} + \frac{1}{X_1}$	Реактивный ток статора двигателя
14	$I_{1k_{o.e.}}$ $k \neq 1$	$I_{1k} = I_{2k} \frac{X_0}{X_1}$	Высшие гармоники тока статора, порядок гармоник $K_1 = 1 + (K - 1) \cdot S$

Таблица 5

№	Обозначение	Формула	Пояснение
1	$P_{ATK(\kappa Bm)}$ активная мощность сети	$P_{ATK(\kappa Bm)} = P_{\delta(\kappa Bm)}(I_{1a} - I_{Ta}) + \Delta P_{ATK(\kappa Bm)}$	$\Delta P_{ATK}$ – потери в преобразовательном каскаде
2	$Q_{ATK(\kappa Ba)}$	$Q_{ATK} = P_{\delta}(I_{1p} + I_{Tp})$	
3	$I_{K1(A)}$	$I_{K1(A)} = I_{\delta(a)} \cdot I_{1k(o.e.)}$	Порядок гармоник $K_1 = 1 + (K - 1)S$ $K = 6n + 1, n = -\infty \div \infty, n \neq 0$
4	$I_{KT(A)}$	$I_{KT(A)} = I_{\delta(a)} \cdot I_{TK(o.e.)}$	Порядок гармоник $K_T$ – канонический